

ПРОКАТКА
СПЕЦИАЛЬНЫХ
ПРОФИЛЕЙ
сложной
формы

• ТЕХНИКА •



**ПРОКАТКА
СПЕЦИАЛЬНЫХ
ПРОФИЛЕЙ
СЛОЖНОЙ
ФОРМЫ**

**КИЕВ
«ТЕХНИКА»
1985**

П80 Прокатка специальных профилей сложной формы /
В. Д. Есипов, Б. М. Илюкович, [Ю. С. Чернобриденко],
И. Н. Киреев.— К.: Техніка, 1985. — 192 с., ил. — Библиогр.: с. 188—190.

В пер.: 75 к. 1000 экз.

Описаны новые схемы прокатки и калибровки, позволяющие повысить точность профиля, уменьшить количество проходов и осуществлять оптимальную схему напряженного состояния при прокатке малопластичных сталей и сплавов. Обобщен опыт прокатки экономичных профилей сложной формы четырехвалковых калибрах. Даны практические рекомендации по повышению производительности прокатных станов и экономии металла.

Рассчитана на инженерно-технических работников предприятий черной металлургии, научно-исследовательских институтов, может быть полезна студентам металлургических вузов.

2704030000-006
ПМ202(04)-85 75.85

34.621

Авторы: В. Д. Есипов, Б. М. Илюкович, [Ю. С. Чернобриденко], И. Н. Киреев
Рецензенты канд. техн. наук Э. П. Николаев, канд. техн. наук Л. Н. Лесик

Редакция литературы по тяжелой промышленности
Зав. редакцией А. Е. Найдек

© Издательство «Техніка», 1985

В решении поставленной ХХVI съездом КПСС задачи дальнейшего улучшения качества и увеличения выпуска экономичных видов проката большое значение имеет расширение сортамента сортового проката, который с 1960 г. обновлен на 40 % при увеличении общего числа профилей более чем в 1,5 раза.

Расширение сортамента за последние годы происходило [12] за счет производства новых профилей отраслевого назначения, применяемых в относительно небольших количествах для конкретных машин, механизмов и сооружений. Применение таких профилей возросло в автомобильной промышленности в 2 раза, в тракторном и сельскохозяйственном машиностроении — в 2,8, в строительном, дорожном и коммунальном машиностроении — в 3, в судостроении — в 1,5, в тяжелом и транспортном машиностроении — в 2 раза.

В настоящее время черная металлургия производит более 5000 профилеразмеров, в том числе более 2000 профилеразмеров проката отраслевого назначения.

Интенсивное развитие народного хозяйства постоянно увеличивает потребность в новых профилях отраслевого назначения.

Наряду с расширением сортамента металлопроката, эффективным средством экономии черных металлов при использовании их для изготовления деталей машин и механизмов, а также снижения затрат времени и труда на изготовление

металлоизделий является широкое использование сортовых и фасонных профилей высокой точности, получаемых различными методами обработки металлов давлением.

Профили высокой точности по размерам и качеству поверхности соответствуют или в максимальной степени приближаются к соответствующим характеристикам готовых деталей машин и механизмов, а их использование в машиностроении и других отраслях народного хозяйства сводит к минимуму операции по механической обработке металла резанием. При этом коэффициент использования металла повышается с 0,30—0,65 до 0,85—0,95, снижается расход дорогостоящего инструмента, высвобождается большой парк металлорежущих станков, а также увеличивается надежность и долговечность машин вследствие повышения механических свойств металла за счет холодной деформации, исключения подрезки волокон в процессе механической обработки и улучшения микротопографии поверхности [27]. По данным машиностроительных предприятий [26], каждые две тонны высокоточных профилей средней сложности, заменяющие сортовой прокат, позволяют высвободить одного рабочего-станочника. Фасонные профили высокой точности получают преимущественно волочением или холодной прокаткой, которые используются в качестве чистовой операции.

В связи с постоянным расширением сортамента фасонных профилей и усложнением их конфигурации находит широкое применение метод горячей и холодной прокатки с использованием четырехвалковых калибров. Этот метод позволяет прокатывать труднодеформируемые стали и сплавы, а также существенно расширить сортамент проката и наладить производство профилей с боковыми продольными пазами различной конфигурации, прокатка которых на обычных станах затруднительна или даже просто невозможна.

В связи с отсутствием систематизированных научных рекомендаций калибровка для горячей прокатки фасонных профилей, одинаковых или близких по конфигурации, на разных станах и заводах проектируется в ряде случаев по-разному и

на основе принципиально различных методов, выбор которых зависит в основном от опыта и знаний калибровщика.

Предлагаемая книга обобщает опыт прокатки сложных фасонных профилей с применением четырехвалковых калибров и опыт разработки специальных четырехвалковых клетей с неприводными вертикальными валками для прокатки мелко- и среднесортных профилей специального назначения в условиях действующих станов.

Отзывы о книге просим присыпать по адресу: 252601, Киев, 1, Крещатик, 5, издательство «Техника».



СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА ПРОФИЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ГОРЯЧАЯ ПРОКАТКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Профили, составляющие сортамент горячекатаного сортового проката, классифицируют по размерам, форме поперечного сечения и назначению. По размерам сортовую сталь делят на крупносортные, среднесортные и мелкосортные профили и катанку (круглая сталь диаметром 5—9 мм, поставляемая в бунтах).

В зависимости от формы поперечного сечения сортовой прокат подразделяют на простые сортовые профили, касательная к любой точке периметра которых не пересекает его поперечное сечение, фасонные и периодические.

К фасонным профилям относят угловые, тавровые, балочные, зетовые и т. д.

По промышленному назначению их подразделяют на фасонные профили общего назначения (угловые профили, двутавровые балки, швеллеры), применяемые в различных отраслях народного хозяйства, и фасонные профили отраслевого и специального назначения, применяемые в одной или нескольких отраслях для однотипных изделий.

Фасонные профили отраслевого и специального назначения нуждаются лишь в минимальной последующей обработке на предприятиях-потребителях или могут использоваться в качестве готовых изделий. Применение этих профилей позволяет экономить у потребителей 20—40 % металла, снижает трудоемкость и себестоимость изготовления машин и изделий. Доля их составляет 37 % в общем сортаменте сортового проката [32].

Горячекатанные фасонные профили, в том числе и отраслевого назначения, могут иметь различную конфигурацию с массой на 1 м длины от 0,5 до 300 кг. В общем случае минималь-

ный объем заказываемой партии в зависимости от массы на 1 м длины 0,5—3; 3—7; 7—15; 15—27; 27 кг соответственно должен составлять 250, 300; 500; 800; 2000 т.

При разработке горячекатанных профилей сложной конфигурации минимальную толщину рекомендуется [32] устанавливать в зависимости от массы на 1 м длины и от ширины элементов (табл. 1). Для профилей шириной свыше 200 мм толщину элементов увеличивают пропорционально ширине.

Допускаемые отклонения на размеры профилей следует устанавливать исходя из требований потребителя прокатной продукции и возможностей технологического оборудования завода-изготовителя.

Прокатка фасонных профилей имеет ряд особенностей. К ним относится неравномерность деформации по поперечному сечению и длине очага деформации, неравномерность охлаждения отдельных элементов профиля в процессе прокатки, необходимость более строго выдерживать температурный режим прокатки, сложность калибровки, затрудненная настройка стана, часто встречающаяся асимметрия профилей относительно одной или даже двух осей и т. д.

С помощью горячей прокатки в двухвалковых клетях получают довольно сложные профили, например профили для шпунтовых свай, накладок изолирующего стыка к рельсам, башмаков гусениц экскаваторов, рельсовых соединений и др. (рис. 1). Однако прокатка в двухвалковых калибрах фасонных профилей с боковыми параллельными гранями, двутавров с параллельными полками, а также профилей с продольными пазами на боковых наружных гранях весьма затруднена или практически невозможна, что объясняется обязательным наличием уклонов боковых стенок двухвалкового калибра и невозмож-

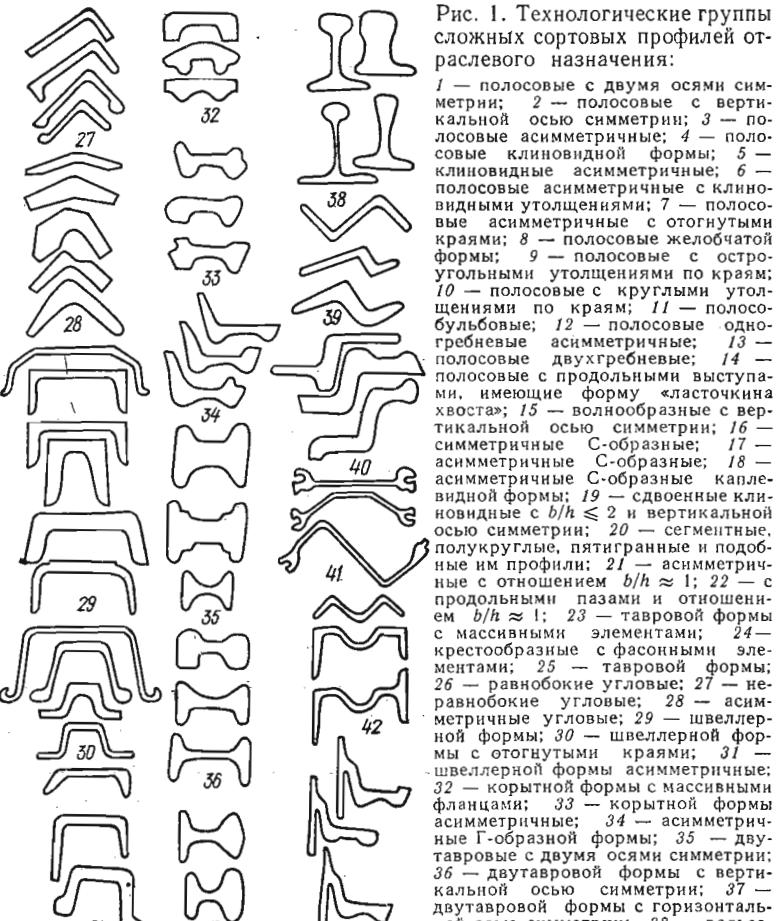
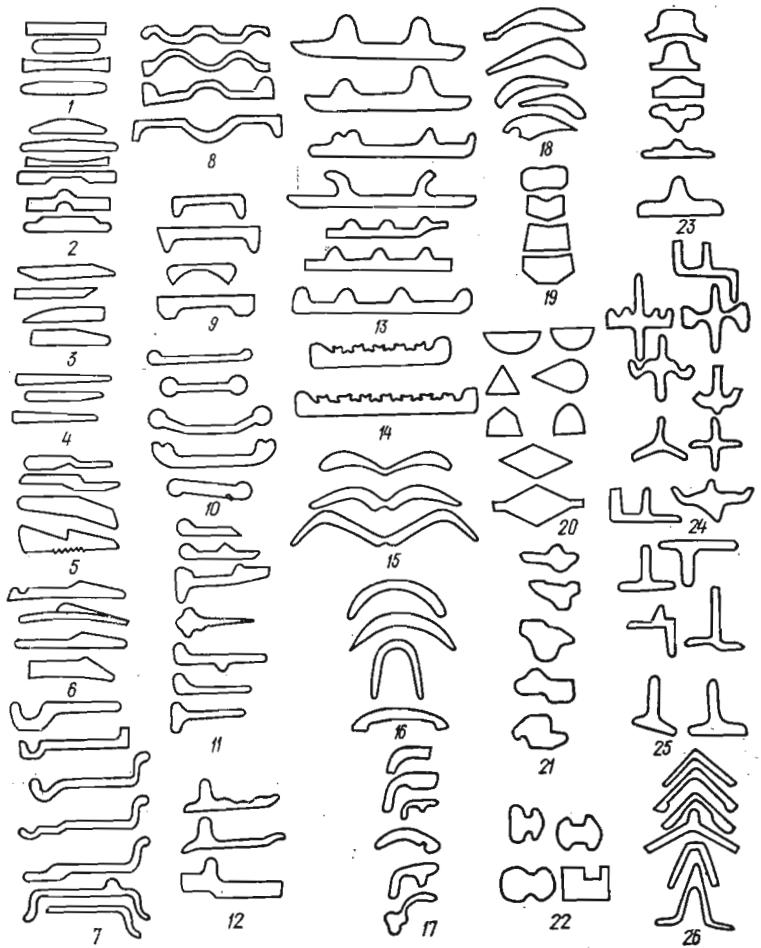


Рис. 1. Технологические группы сложных сортовых профилей отраслевого назначения:

1 — полосовые с двумя осями симметрии; 2 — полосовые с вертикальной осью симметрии; 3 — полосовые асимметричные; 4 — полосовые клиновидной формы; 5 — клиновидные асимметричные; 6 — полосовые асимметричные с клиновидными утолщениями; 7 — полосовые асимметричные с отогнутыми краями; 8 — полосовые желобчатой формы; 9 — полосовые с остроугольными утолщениями по краям; 10 — полосовые с круглыми утолщениями по краям; 11 — полособульбовые; 12 — полосовые одногребневые асимметричные; 13 — полосовые двухгребневые; 14 — полосовые с продольными выступами, имеющие форму «ласточкина хвоста»; 15 — волнообразные с вертикальной осью симметрии; 16 — симметричные С-образные; 17 — асимметричные С-образные; 18 — асимметричные каплевидной формы; 19 — сдвоенные клиновидные с $b/h \leq 2$ и вертикальной осью симметрии; 20 — сегментные, полукруглые, пятигранные и подобные им профили; 21 — асимметричные с отношением $b/h \approx 1$; 22 — с продольными пазами и отношением $b/h \approx 1$; 23 — тавровой формы с массивными элементами; 24 — крестообразные с фасонными элементами; 25 — тавровой формы; 26 — равнобокие угловые; 27 — равнобокие угловые; 28 — асимметричные угловые; 29 — швеллерной формы; 30 — швеллерной формы с отогнутыми краями; 31 — швеллерной формы асимметричные; 32 — корытной формы с массивными фланцами; 33 — корытной формы асимметричные; 34 — асимметричные Г-образной формы; 35 — двутавровые с двумя осями симметрии; 36 — двутавровой формы с вертикальной осью симметрии; 37 — двутавровой формы с горизонтальной осью симметрии; 38 — рельсовой формы; 39 — зетовой формы; 40 — шпунтовая сталь; 41 — М-образной формы; 42 — для рельсовых соединений.

ностью прокатки с отрицательным уклоном («поднутрением») боковых стенок калибра.

С точки зрения устойчивости положения раската при прокатке в калибрах и использования прокатного стана фасонные профили можно разделить на 3 группы: с вертикальной осью симметрии; только с горизонтальной осью симметрии и асимметричные, имеющие отношение ширины к высоте $b/h \leq 2,5$; только с горизонтальной осью симметрии и асимметричные с отношением $b/h \geq 4$.

При прокатке фасонных профилей с вертикальной осью симметрии положения раската в калибре и на выходе из него устойчиво, изгиб полосы («серпение») в горизонтальной плоскости при нормальной настройке стана не наблюдается, поэтому для прокатки данных профилей могут быть использованы линейные станы и станы с последовательным расположением клетей, включая и непрерывные.

Процесс прокатки асимметричных профилей и профилей только с горизонтальной осью симметрии, имеющих отношение $b/h \approx 1..2,5$, обычно сопровождается на выходе из валков скручиванием вокруг продольной оси раската или «серпением», а прокатка аналогичных профилей с отношением $b/h \geq 4$ сопровождается, как правило, значительным «серпением» раската. Для устранения скручивания или «серпения» при прокатке указанных фасонных профилей требуется более жесткая вводная и выводная арматура рабочих клетей. В связи с вышеизложенным прокатка фасонных профилей, не имеющих вертикальной оси симметрии, на станах с последовательным расположением рабочих клетей сопровождается значительными затруднениями в передаче раската от одной клети к другой в необходимом положении.

Фасонные профили общего и отраслевого назначения должны прокатываться на высокопроизводительных станах, имеющих высокий уровень механизации и автоматизации производственных процессов.

Прокатка на непрерывных станах сложных профилей, особенно асимметричных, или профилей, имеющих только гори-

зонтальную ось симметрии, технически трудноосуществима, так как отсутствуют надежные системы регулирования натяжения металла между клетями и возникают значительные затруднения в передаче от одной клети к другой переднего конца полосы в требуемом положении из-за скручивания и «серпения» раската на выходе из предыдущей клети.

Сложные фасонные профили, необходимые потребителю в относительно небольших количествах, более целесообразно прокатывать на сортовых станах линейного типа. При этом металл из калибра в калибр передается вручную вследствие невозможности использования для этой цели обводных аппаратов существующих конструкций.

В перспективе количество и разнообразие новых фасонных профилей будет постоянно возрастать, так как экономический эффект от использования 1 т сложного профиля отраслевого назначения в народном хозяйстве в несколько раз выше, чем при использовании сортовых профилей общего назначения.

Основная трудность расширения сортамента и производства высокоэффективных сортовых профилей состоит в том, что эти профили в большинстве случаев необходимы потребителям в относительно небольших количествах, которые редко превышают 100—200 т в год. Прокатка таких партий металла на современных высокопроизводительных станах заметно снижает производство стана вследствие значительных потерь рабочего времени на дополнительные перевалки валков и настройки стана.

В настоящее время основное производство новых фасонных профилей малотоннажными партиями сосредоточено на линейных станах, так как на этих станах выпуск осуществляется с меньшими затратами средств и потерями производственной продукции, чем на современных непрерывных и полунепрерывных станах.

Наиболее высоким техническим уровнем характеризуются полунепрерывные и непрерывные сортовые станы. Однако они производят ограниченный сортамент сложных фасонных про-

филей, что объясняется в основном трудностями ввода несимметричной полосы в калибр.

Для производства фасонных профилей партиями средней тоннажности более целесообразно использовать шахматные и линейные сортовые стани.

ПРЕССОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СТАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Процесс горячего прессования первоначально применялся только для обработки цветных металлов и сплавов. Деформация этих материалов осуществлялась при низких скоростях прессования (≥ 2 мм/с) и невысоких температурах нагрева (≥ 250 °C). При таких условиях прессовый инструмент из инструментальных сталей обладает высокой стойкостью и обеспечивает получение качественных изделий любой конфигурации.

Теоретической и технической основой широкого промышленного развития процесса прессования металлов и сплавов, помимо решения проблемы смазки, явились следующие моменты [6].

1. При прессовании металл в очаге деформации находится в наиболее благоприятном, с точки зрения повышения деформируемости, объемно-напряженном состоянии всестороннего неравномерного сжатия. Деформация при этом протекает по двум осям как деформация укорочения, а по одной — как деформация удлинения. Такая схема напряженного состояния и деформации позволяет осуществлять обработку давлением малопластичных материалов.

2. Успехи в области развития качественной металлургии дали возможность применить для прессового инструмента высокостойкие и жаропрочные стали и сплавы, способные выдерживать большие удельные нагрузки при повышенных температурах.

3. Благодаря успехам конструкторов и машиностроителей были созданы высокопроизводительные гидравлические установки с усилием прессования до $9,8 \cdot 10^7$ Н, позволяющие осуществлять деформацию со скоростью 300—500 мм/с при производительности до 120 прессований в час.

Эксплуатация современных механических и гидравлических прессовых установок позволила установить [17] основные преимущества и недостатки процесса прессования.

К наиболее существенным технологическим преимуществам прессования относятся:

1. Основной вид напряженного состояния пластической зоны — трехосное сжатие, что обуславливает повышение пластичности прессуемого металла и позволяет вести процесс с весьма большими частными деформациями.
2. Разнообразие форм поперечного сечения профилей (сплошные и полые со ступенчатыми или плавно переменным изменением поперечного сечения по длине).
3. Быстрая перевода процесса прессования с одного типо-размера пресс-изделия на другой путем замены матриц.
4. Повышенная точность пресс-изделий.

Основные технологические недостатки прессования:

1. Ограничение при прессовании ряда металлов и сплавов скоростей прессования и истечения в связи с возникновением при больших скоростях условий, вызывающих нарушение целостности периферийных слоев пресс-изделия.
2. Необходимость оставления больших пресс-остатков, снижающих выход годного, особенно при прессовании сплошных профилей.
3. Ограничение длины заготовки, обусловленное прочностью пресс-штемпеля или его продольным изгибом, а также другими деформационными условиями.
4. Повышенная неравномерность деформации металла.
5. Сравнительно низкая стойкость инструмента и его высокая удельная стоимость.

В связи с изложенным можно определить основные области применения процесса прессования: производство профилей и труб сложной формы, особенно из металлов и сплавов, прессуемых с высокими скоростями истечения; обработка хрупких металлов и сплавов; среднее и мелкосерийное производство, когда стоимость переработки прессовых отходов невелика.

Перед прессованием наружная поверхность исходных

заготовок обтачивается. Необходимость улучшения поверхности заготовок вызвана применением стеклосмазки. В условиях трения скольжения между деформируемым металлом и жестким технологическим инструментом пленка расплавленного стекла заполняет неровности на поверхности металла и не сглаживает их при деформации, а в некоторых случаях даже увеличивает. На гладкой же поверхности металла пленка стекла распределяется равномерным слоем, обеспечивает малую шероховатость поверхности изделия и предохраняет ее от возникновения дефектов.

При резке заготовки на мертвые длины отклонение плоскости реза от перпендикуляра к оси заготовки не должно превышать 1,0—1,5 мм в зависимости от диаметра заготовки. На одном из концов заготовки должна быть конусность или фаска. В случае прессования полых профилей в заготовке либо просверливают сквозное отверстие, либо прошивают его на специальных прессах.

Общим требованием при нагреве заготовок является отсутствие окалины на поверхности металла. Это достигается либо применением безокислительного нагрева, либо удалением окалины путем гидросбива. Так как при нагреве заготовок из нержавеющих сталей образующаяся окисная пленка тяжело удаляется на установках гидросбива, то целесообразно в этом случае использовать безокислительный нагрев.

Для снижения усилий прессования, повышения качества пресс-изделий и увеличения стойкости инструмента применяют технологические смазки, которые представляют собой стекла различного состава или силикатное соединение природного, а также искусственного происхождения. Процесс нанесения смазки является важной технологической операцией, и от того, как он выполнен, зависит эффективность прессования.

Для смазок разрабатывают специальные составы стекол в зависимости от температуры обработки и способа нанесения смазки на металл. Главной характерной особенностью стеклообразных веществ является постепенный переход при нагреве из твердого в вязкое и жидкое состояние, а также непрерыв-

ность и обратимость изменения свойств при различных температурах. Теплоизоляционные свойства стеклосмазки определяются ее теплопроводностью.

Удаление стеклосмазки с прессованных изделий — трудоемкая и дорогостоящая операция. Для снятия стекла существуют два способа: механический (с помощью дробеструйных установок) и химический. Дробеструйная обработка более дешевая, однако чаще применяют химический способ, особенно для изделий из нержавеющих сталей и высоколегированных сплавов.

Для горячего прессования необходимо следующее оборудование: металлорежущие станки, нагревательные устройства, прессы, правильное и вспомогательное оборудование. В отделении подготовки осуществляют раскрой металла, обточку наружной поверхности, обработку торцов заготовки и в случае необходимости — сверловку. Для нагрева заготовки применяют в основном газовые печи с врачающимся подом и окислительной или восстановительной атмосферой и горизонтальные индукционные печи. Наиболее важным технологическим инструментом является матрица, которую изготавливают из горячештампованных сталей (3Х2В8, 3Х2В8Ф, ХН56ВМКЮ, ВК25В, ЦМ-2А и т. д.) резанием или литьем по выплавляемым моделям. Используются также матрицы со вставками из жаропрочных сплавов.

Твердость поверхности матриц после термообработки *HRC* 48—50. Наибольшему износу при прессовании подвергаются острые кромки, выступающие грани и острые углы. Поэтому предусматриваются скругления острых кромок с радиусами 1—2 мм для внутренних и 4—6 мм для наружных переходов. Однако стойкость матриц при изготовлении фасонных профилей невелика и составляет в среднем 2—8 прессовок в зависимости от сложности сечения профиля и требуемой точности размеров.

Преимущества горячего прессования в экономическом плане подтверждены [23] отечественным и зарубежным опытом. Так, по данным Никопольского Южнотрубного завода, себе-

стоимость прессованных фасонных заготовок практически не зависит от величины заказа на профиль и равна 340—360 р./т.

Холодное прессование применяют для изготовления деталей из алюминия, меди, латуни, магния, цинка и сплавов этих металлов, а также стали различных марок. Обычно под холодным прессованием понимают прессование металлов и сплавов при докристаллизационной температуре. Для стали температура без перехода в докристаллизационное состояние может быть доведена до 500—600 °С, для бериллия — до 400 °С [17]. Принципиально схема холодного прессования с прямым истечением не отличается от схемы горячего прессования, но длина изделий при холодном прессовании ограничена.

Холодное прессование осуществляется на специальных прессах с применением высоких энергий и при скорости до 100 м/с. Оно применяется [6] для изготовления профилей из углеродистых (до 0,35 % С) и хромоникелемолибденовых (до 2 % Ni, до 13 % Cr и до 0,3 % Mo) сталей. Наилучшие результаты получены при холодном прессовании сталей с ферритной или ферритно-перлитной структурой и твердостью заготовки *HRB* до 60—80 и σ_b до 0,78 кГа. При холодном прессовании увеличиваются предел прочности и твердость примерно в 2 раза, а предел текучести — в 2,5—3 раза при значительном относительном удлинении. Допуски на размеры составляют от $\pm 0,05$ до $\pm 1,27$ мм.

К недостаткам холодного прессования следует отнести повышенную стоимость, наличие специального оборудования и ограничения длины изделий.

За последние годы находит [34] применение гидропрессование, при котором, кроме механического воздействия на заготовку, передаются усилия от жидкости или другой среды (бин-гамовские пластики, мягкие металлы и т. д.) высокого давления или без механического воздействия.

Преимущества гидропрессования перед обычным прессованием заключаются в следующем:

1. Всестороннее высокое гидростатическое давление на за-

готовку улучшает схему напряженного состояния и снижает возможность появления зон с растягивающими напряжениями.

2. Гидродинамический режим трения в матрице повышает равномерность деформации и снижает затраты энергии на прессование. Равномерность деформации при гидропрессовании во много раз выше, чем при обычном прессовании, а давление, при прочих равных условиях, на 20—40 % ниже.

3. Отсутствует распрессовка заготовки, исключается дополнительная деформация осадки, что особенно важно для крупных материалов.

4. Возможно выдавливание заготовок различных размеров и поперечного сечения с использованием одного контейнера.

5. Деформирование металла в условиях всестороннего сжатия и малых сил трения обеспечивает равномерное распределение свойств и структуры по сечению пресс-изделия, а также улучшает физико-механические характеристики металла.

Примером выполнения отдельных промышленных участков гидропрессования фасонных профилей может служить [34] специализированное отделение гидропрессования Омутнинского металлургического завода, основное и вспомогательное оборудование которого размещено в трехпролетном здании на площади 72 × 96 м.

В качестве исходной заготовки используется горячекатанный круг диаметром 35—70 мм, длиной 2—6 м из углеродистой конструкционной, инструментальной и легированной сталей. После правки и сплошной обдирки заготовок наносится подсмазочный слой (оксалатирование, омеднение, фосфатирование и др.) и смазка (натровое мыло, графит, дисульфид молибдена).

Подготовленные заготовки поступают на участок гидропрессования, в котором расположены три вертикальных и один специальный горизонтальный пресс. Технология гидропрессования фасонных профилей предусматривает полунепрерывное прессование заготовок. При этом способе заготовка диаметром 35—70 мм и длиной 0,9—3 м прессуется одна за другой встык. Прессованные изделия поступают на отделку, включа-

ющую правку на правильно-растяжных машинах с деформацией 2—3 %, контроль, испытание, промасливание и упаковку..

В условиях существующей технологии производства фасонных профилей наиболее эффективными являются профили с площадью поперечного сечения 100—877 мм^2 для деталей с массой до 0,5 кг.

ВОЛОЧЕНИЕ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Технология производства фасонных профилей методом волочения включает [15] те же операции, что и технология производства простых профилей (например, круга и квадрата): остриение концов, термическую обработку и подготовку поверхности заготовки к волочению, волочение (переходное и окончательное) и термообработку готового профиля.

Однако при освоении производства фасонных профилей было установлено, что технология волочения обычной калиброванной стали не может быть полностью применена при изготовлении фасонных профилей, так как ряд операций имеет свои характерные особенности.

При волочении фасонных профилей напряженное состояние в очаге деформации существенно усложняется вследствие неравномерности удлинения отдельных элементарных объемов профиля. Для того чтобы деформация металла начиналась одновременно по всему периметру профиля, необходимо стремиться к плоской или близкой к ней кривой соприкосновения металла (линии входа в очаг деформации) с образующими канала волоки. В этом случае образующие контактной поверхности волочильного канала получают разные наклоны к оси канала. Появляются дополнительные деформации, определяемые разными формами начального и конечного поперечных сечений, что ведет к увеличению неравномерности упрочнения отдельных элементарных объемов. Условие пластичности в каждой точке зоны очага деформации для фасонных профилей будет отличаться от условия пластичности круглого профиля

вследствие неодинаковых нормальных напряжений на контактной поверхности в пределах одного поперечного сечения.

В общем случае напряжение волочения фасонных профилей всегда больше, чем для круглых профилей одинаковых сечений при прочих равных условиях. Это происходит главным образом из-за увеличения контактной поверхности и сил трения. Поэтому [23], если при волочении круглых профилей обжатие за один проход составляет 20—25 %, то в случае волочения фасонных профилей при неравномерной деформации обжатие уменьшают до 10 %. Число проходов зависит от величины обжатия, сопротивления деформации, требуемой шероховатости, точности и формы профиля. Сложная конфигурация профиля (тонкие отдельные элементы, значительная разница в их толщине, узкие глубокие пазы, выступы с острыми кромками и т. д.) вызывает необходимость значительного увеличения числа проходов. На получение профиля заданной формы, помимо технологических факторов, оказывают влияние геометрия волоки, форма исходной заготовки, качество и вид материала. Поэтому расчет калибровки фасонных профилей, как и при горячей прокатке, ведут от готового профиля против хода волочения.

При выборе формы и размеров сечения заготовки для фасонного профиля следует учитывать [15], что усилия деформирования металла в волоке должны взаимно уравновешиваться по горизонтальной и вертикальной осям сечения обжимаемого профиля, иначе заготовка в волоке будет смещаться и заданные формы сечения не получатся. Кроме того, следует отметить, что при соблюдении условия равновесия в предварительных проходах заготовку можно обжимать и не по всему контуру сечения. Однако при этом обжатия в различных точках периферии сечения должны быть выбраны так, чтобы обеспечивалось заполнение углов профиля без разрушения поверхностных слоев металла.

В качестве заготовки для волочения применяются горячекатаные и горячепрессованные простые и фасонные профили, а также холоднокатаные профили. Вид заготовки определяет

маршрут волочения. Перед волочением осуществляют ост्रение переднего конца заготовки, отжиг, травление, нейтрализацию и подготовку поверхности.

Острение (оттяжка) конца заготовки является [34] требоемой и технически сложной операцией. Острение выполняют с таким расчетом, чтобы конец на расстоянии 120—180 мм был утонен на 0,2—1,0 мм с плавным переходом к основному сечению заготовки. От правильного острения во многом зависит равномерность и плавность входа металла в очаг деформации и надежный захват заготовки. Поэтому острение фасонных профилей является одной из важных проблем. В настоящее время известны следующие способы острения: острение в обжимных калиброванных валках в горячем и холодном состоянии; электрохимическая и химическая обработка (анодное и кислотное растворение); механическая обработка (фрезерование, строжка); свободная ковка; горячая штамповка; растяжение конца с местным нагревом в зоне острения; сжигание поверхностного слоя в атмосфере кислорода.

Наиболее распространено острение в обжимных валках, которое применяется для острения как прямоугольных, так и более сложных профилей. Обычно при поперечном сечении профиля 60—300 мм^2 такое острение осуществляется в холодном состоянии, более 300 мм^2 — в горячем. Для профилей простой симметрии с соотношением сторон около 1,5 при площади поперечного сечения более 500 мм^2 в отдельных случаях можно применять принудительную задачу (заталкивание) конца прутка в волоку без предварительного острения.

Расходы на острение в общей стоимости всего передела при производстве профилей составляют от 5 до 12,5 %.

Вследствие повышенных давлений и сил трения в очаге деформации фасонные профили с качественной поверхностью могут быть получены только с помощью смазки и с предварительным нанесением подсмазочного слоя с высокой адгезией к металлу, достаточно высокой прочностью и низким коэффициентом трения. Для нанесения подсмазочного слоя применяют известкование, фосфатирование, покрытие тринатрийфос-

фатом, стеклом и т. д. Наилучшие результаты получаются при омеднении вместе с фосфатированием и использовании в качестве смазки чистого мыла или смазок на его основе. Для смазки также применяют машинное масло с дисульфидом молибдена, олифу, резьбовую смазку, вторичные жирные спирты и т. д. Скорость волочения фасонных профилей из углеродистых сталей 0,3—1,0 м/с.

При построении маршрутов волочения следует соблюдать следующие условия: готовый профиль должен быть обжат по всему периметру сечения, при этом нужно учитывать равномерное обжатие отдельных элементов по сечению профиля.

В работе [15] на основании опытов приведены (табл. 2) частные обжатия за один проход в зависимости от размеров элементов профиля.

Фасонные профили обычной и высокой точности протягивают в большинстве случаев на прямолинейных цепных станах с усилием волочения от $7,85 \cdot 10^4$ до $5,89 \cdot 10^5$ Н. Иногда для тех профилей, которые допускают намотку на барабан, используют барабанные волочильные станы с усилием до $9,81 \times 10^4$ Н.

При волочении фасонных профилей применяют [23] волоки различных конструкций: монолитные твердосплавные и стальные сборные, сборные с вкладышами, армированные твердым сплавом и т. д. Разнообразие конструкций волок вызвано, с одной стороны, спецификой их изготовления в условиях металлургических заводов, с другой — потребностью в фасонных профилях и требованиями к качеству профилей.

Стойкость волок при волочении профилей с площадью сечения 80—100 мм^2 из углеродистых сталей по 4-му классу

2. Частные обжатия за один проход

Размеры элементов профиля, мм	Частные абсолютные обжатия элемента, мм	Относительные обжатия за один проход, %
4—12	0,5—2	25
12—20	2,0—2,3	25
20—30	2,3—2,5	20
30—40	2,5—3,5	15
40—50	3,5—4,0	10

точности достигает 6 т, а по 3-му — 2,5—3,0 т. Так как масса партии фасонных профилей в большинстве случаев обычно не превышает 5 т, то, следовательно, стойкость стальных волок при скорости волочения до 10 м/мин, тщательной подготовке поверхности и смазке оказывается вполне достаточной. В среднем стойкость стальных волок при скорости волочения до 10 м/мин равна по длине 1000—2000 м профиля, а твердосплавных — 500—10 000 м. Для изготовления твердосплавных волок рекомендуются карбидовольфрамовые сплавы ВК2, ВК3М, ВК6, ВК8, ВК8В, ВК10 и ВК15.

Применение волок из инструментальных сталей позволяет получать профили с допуском до 0,1 мм, а волок из твердого сплава — до 0,05 мм. Радиусы закруглений и переходов обычно от 0,5 до 1,0 мм, но не менее 0,3 мм. Волоки для фасонных профилей изготавливают по 3-му классу точности ОСТ 1013 (ОСТ 1023).

Себестоимость изготовления фасонных профилей волочением зависит от формы и площади поперечного сечения профиля, числа проходов, марки материала, величины заказа и т. д.

Дальнейшим усовершенствованием процесса волочения является применение роликовых волок. В нашей стране принципиальную схему волочения через роликовую волоку впервые предложили А. И. Целиков и А. В. Кругликов.

Применение роликовых волок при волочении фасонных профилей позволяет увеличить единичную деформацию, сократить число переделов, повысить стойкость инструмента и получить профиль с повышенными механическими свойствами. При этом роликовые волоки можно применять как на цепных, так и на барабанных волочильных станах.

Технологическая схема волочения через роликовые волоки не отличается от обычной. Преимущества волочения через роликовые волоки обусловлены особенностями деформации, которые позволяют по сравнению с обычным волочением осуществлять от двух до четырех проходов без промежуточных отжигов со значительной вытяжкой за проход и волочение с

большими скоростями (до 4 м/с). Обжатие за один проход составляет 20—30 %, а иногда достигает и 80 %.

Для профилей с поперечным сечением до 36 и 196 мм² изготавливаются [34] волочильные агрегаты с четырехроликовыми волоками конструкции ВНИИметмаша. В составе оборудования стана для профилей с сечением до 36 мм² входят размоточная фигура,стыкосварочная машина, роликовое правильнозадающее устройство, две клети с четырехроликовыми волоками, тянувший намоточный барабан с приводом, роликовая правильная машина, летучие барабанные ножницы и подъемный кран. Профили изготавливаются в прутках и в бунтах. Точность размеров отдельных профилей достигает 2-го класса точности. Стан работает с регулируемой скоростью до 2,5 м/с.

В настоящее время волочением через роликовые волоки получают фасонные и простые профили. Точность профиля составляет $\pm 0,025$ мкм, стойкость роликов без переточек достигает 30 т, а с учетом переточек — 200 т.

Недостатки процесса волочения через роликовые волоки обусловлены в основном конструктивными причинами: мала жесткость роликовых волок, недостаточна стойкость подшипниковых узлов и калибра. Экономические преимущества этого процесса еще полностью не используются.

ПРОИЗВОДСТВО СТАЛЬНЫХ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ

Помимо горячекатанных фасонных профилей отраслевого назначения обычной точности в последние годы находят все большее применение сортовые и фасонные профили высокой точности (прецзионные) [26, 27], которые по форме и размерам поперечных сечений максимально приближаются к готовым деталям и которые получают с помощью волочения и холодной прокатки.

Стальные фасонные профили высокой точности [5] в последние годы получили широкое распространение и поставляются по ТУ 14-1-1271—75. Предельные параметры этих профилей: площадь поперечного сечения — от 4 до 6000 мм²; сечение

профиля должно вписываться в окружность диаметром не более 220 мм; гарантированные радиусы закругления внутренних углов — не менее 1 мм; гарантированные радиусы закругления наружных углов — не менее 0,3 мм.

Предельные параметры профилей, изготавливаемых заводами-поставщиками, регламентируются специализацией (табл. 3).

Простые профили изготавливаются по 3-му, 4 и 5-му классам точности (ОСТ НКМ 1027, ОСТ 1024, ОСТ 1025). Фасонные про-

3. Специализация изготавителей фасонных профилей высокой точности

Предельные параметры профилей	ПО «Ижсталь»	Омутнинский металлургический завод	Череповецкий сталепрокатный завод
Площадь поперечного сечения, мм^2	15—2500	4—1600	4—5000
Максимальный диаметр описанной окружности, мм	60	100	220
Длина прутков, м:			
номерная	2—6	2—7	2—7
мерная, или кратная	1,5—4	1,5—6	1,5—4
Минимальная толщина элементов, мм	3,5	По соглашению сторон	

фили могут изготавливаться по 2-му или 3-му классам. Кроме того, по соглашению сторон фасонные профили высокой точности поставляются в нагартованном или термически обработанном состоянии (нормализация, отпуск, смягчающая термообработка).

Качество поверхности профилей должно соответствовать нормам ГОСТ 1051—73: для профилей классов точности 3а, 4 и 5 — группам Б или В; для профилей классов 2 и 3 — группам А или Б класса точности 3а. По требованию потребителей профили контролируются на твердость по ГОСТ 1051—73. Кроме того, проверяются механические свойства профилей, которые определяются соглашением сторон.

Необходимые точность и чистота поверхности при производстве стальных профилей высокой точности достигаются путем применения волочения или холодной прокатки на заключительных формообразующих операциях.

По требованию потребителей профили из стали с содержанием углерода по нижнему пределу более 0,3 % поставляются с проверкой обезуглероженного слоя. Общая глубина обезуглероженного слоя на сторону не должна превышать 1,5 %, а для стали, легированной кремнием, — не более 2 % диаметра или толщины. За толщину принимается сторона квадрата, по площади равновеликого сечению профиля.

В работе [27] фасонные профили высокой точности разделены по принципиальным отличиям конфигурации сечения на 99 групп. При этом за характерные признаки сечения приняты: фаски — скосы наружных углов контура на величину не более половины стороны; лыски — срезы у криволинейной части контура на величину не менее $\frac{2}{3}$ радиуса кривизны; пазы — выемки шириной не более половины ширины профиля и глубиной h_n , равной или менее $5H\sqrt{H}/(H+5)$, но не более $H/3$, где H — исходная толщина или габарит профиля по оси выемки; выступы — выступающие над контуром элементы шириной не более половины ширины профиля и высотой h_e , равной или менее $5H\sqrt{H}/(H+5)$, но не более $H/3$, где H — толщина профиля до основания выступа по его оси.

По площади поперечного сечения все профили согласно ТУ 14-1-1271—75 подразделяются на 10 подгрупп, при этом введена как эталонная группа «0», к которой относится сталь калиброванная круглая по ГОСТ 7417—74:

Подгруппа	Площадь сечения профиля, мм^2
0	Более 2800
1	1500—2800
2	800—1500
3	400—800
4	200—400
5	100—200

6	50—100
7	25—50
8	10—25
9	4—10

В зависимости от конфигурации и размеров элементов поперечного сечения профили делятся на 9 групп сложности изготовления профиля (рис. 2).

Так как фасонные профили высокой точности должны быть максимально близки по качественным показателям (точности размеров, чистоте поверхности, механическим свойствам и т. д.) к готовым деталям, то для их производства используют [23] следующие технологические схемы, включающие на стадии чистовых операций только способы холодной обработки: 1) волочение на промежуточный размер — волочение на конечный размер; 2) горячее прессование — волочение на промежуточный размер — волочение на конечный размер; 3) горячее прессование — холодная прокатка на промежуточный размер — волочение на конечный размер; 4) горячая прокатка — волочение на промежуточный размер — волочение на конечный размер; 5) горячая прокатка — холодная прокатка — волочение; 6) холодная прокатка на промежуточный размер — холодная прокатка на конечный размер; 7) горячая прокатка — холодная прокатка; 8) холодное прессование.

Выбор технологической схемы определяется формой и размерами сечения профиля и стремлением изготовить его с наименьшими затратами при минимуме технологических переделов.

В настоящее время отечественной промышленностью освоено свыше 4000 профилеразмеров стальных и фасонных профилей высокой точности.

Производство стальных фасонных профилей высокой точности в виде прутков или бунтов осуществляют в специализированных цехах производственного объединения «Ижсталь», Омутнинского металлургического завода, Череповецкого сталепрокатного завода и Ленинградского завода турбинных лопаток, а также в небольших количествах на других заводах.

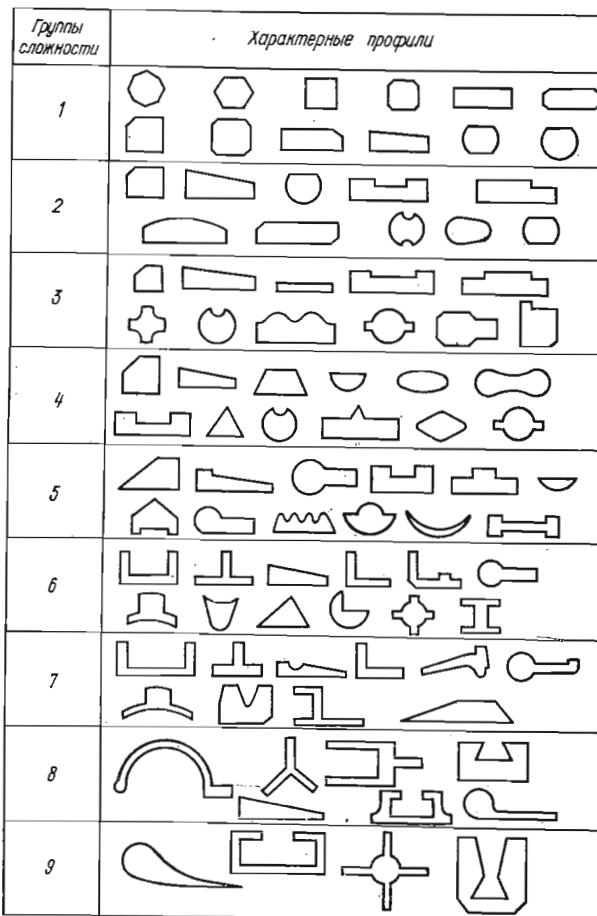


Рис. 2. Профилепредставители групп сложности изготовления профилей высокой точности.

Опыт производства фасонных профилей высокой точности показывает, что наиболее целесообразным технологическим процессом производства большинства профилей со сравнительно сложной конфигурацией сечения следует считать сочетание деформации в горячем состоянии для получения фасонной заготовки, весьма близкой по форме сечения к готовому профилю, и одного-двух проходов холодной деформации для достижения необходимой точности и качества поверхности профиля.

Для получения фасонных заготовок (подкатов) под последующую холодную обработку широко используется горячая прокатка и горячее прессование. На большинстве заводов основной объем производства осуществляется по технологической схеме, включающей горячую прокатку фасонных подкатов, максимально приближающихся по форме и размерам к готовому профилю, с последующим их волочением или холодной прокаткой на готовый профиль.

Горячая прокатка осуществляется при температуре 850—1200 °С за один или несколько проходов с обжатием 10—60 % за пропуск.

При производстве особо сложных профилей, с целью увеличения точности формы и размеров, практикуется прокатка с переполнением чистового калибра, которая гарантирует получение профиля с необходимой формой сечения. Образующиеся на готовом профиле лампасы удаляются затем наждачными кругами, на протяжных станках или с помощью специальных машин для срезания лампсов.

В последние годы для горячей прокатки фасонных заготовок находят широкое применение специализированные станы с последовательным расположением клетей.

На Ленинградском заводе турбинных лопаток установлен трехклетевой стан 630/420 (рис. 3, а), состоящий из реверсивной обжимной клети 630 с длиной бочки валков 1000 мм и двух клетей 630 с длиной бочки валков 500 мм. Валки — на подшипниках качения. Для мелких профилей используются валки диаметром 420 мм. Исходные заготовки — сечением

120 × 120 и 200 × 200 мм. Стан в основном специализирован на прокатке профилей для турбинных лопаток.

На рис. 3, б показан шестиклетевой стан 300 ПО «Ижсталь» конструкции Электростальского завода тяжелого машиностроения. Стан предназначен для прокатки фасонных профилей и подкатов с площадью поперечного сечения 100—2500 мм² из заготовки круглого диаметра 30—80 мм и квадратного со стороной 30—80 мм сечений. В обжимной реверсивной клети 400 выполняются 1—3 прохода. Клеть 400 может работать в режиме блюминга, т. е. с изменением зазора между валками после каждого прохода. Клети 2—6 расположены в две линии. Валки — на подшипниках жидкостного трения. Длина бочки валков клети 1—1000 мм, остальных клетей — 600 мм. Скорость прокатки — до 5 м/с, производительность стана — до 4 т/ч. Перевалка выполняется клетями. Замена одной клети требует 3—5 мин.

УкрНИИметом совместно с Гипросталью и ВНИИМетмашем разработана [16] конструкция стана для прокатки фасонных профилей в широком сортаменте (рис. 3, в). Стан состоит из одной реверсивной обжимной клети 680 и двух параллельных линий рабочих клетей. Первая линия предназначена для прокатки крупносортных и среднесортных профилей, вторая — среднесортных и мелкосортных. Производительность стана 150 тыс. т при объеме партий от 5 до 300 т. Первая линия состоит из восьми двухвалковых клетей с диаметром 660 мм и длиной бочки валков 600 мм. Клети оборудованы удлиненными шпинделями и рассчитаны на работу с валками диаметром от 480 до 680 мм. Вторая линия состоит из восьми двухвалковых клетей 370 с длиной бочки 400 мм и диаметром валков 280—370 мм. Перевалка производится комплектами валков. Вместо последних двух клетей каждой линии предусмотрена установка универсальных клетей или клетей повышенной жесткости.

На рис. 3, г приведено расположение оборудования четырехклетевого непрерывного стана 300 конструкции ВНИИМетмаша — АЗТМ, установленного в цехе фасонных профилей

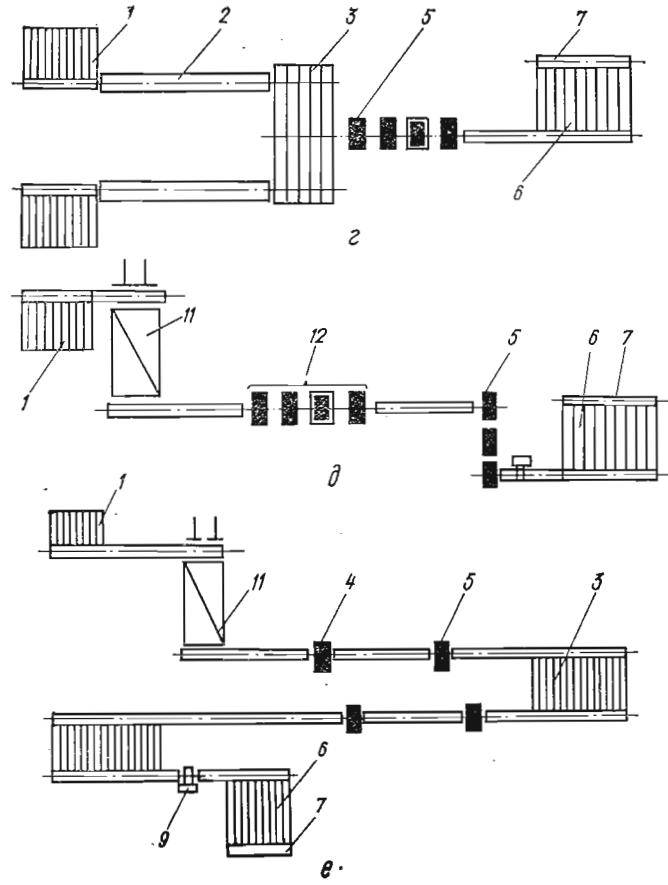
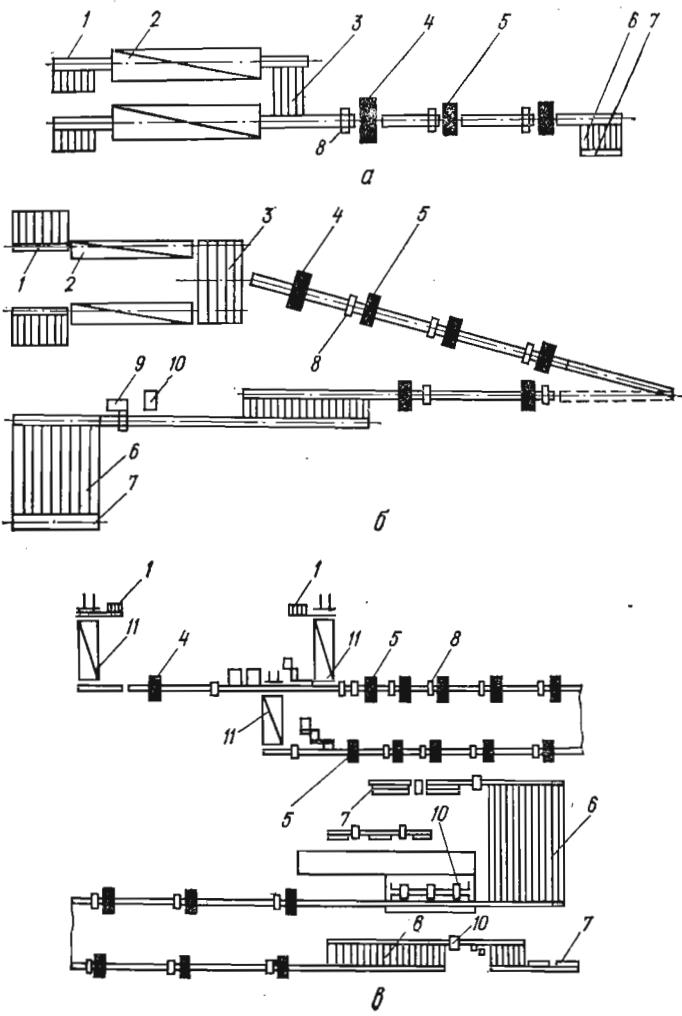


Рис. 3. Схемы расположения прокатных станов с последовательным расположением клетей:

1 — загрузочная решетка; 2 — индукционная печь; 3 — шлелпер; 4 — обжимная реверсивная клеть; 5 — чистовая группа клетей; 6 — холодильник; 7 — карман; 8 — кантователь; 9 — ножницы; 10 — пила; 11 — нагревательная печь; 12 — чернозая группа клетей.

Череповецкого сталепрокатного завода для прокатки профилей сечением 300—2000 мм² и длиной до 7 м. Исходная заготовка квадратного со стороной 20—60 мм и круглого диаметром 20—70 сечений. Скорость прокатки 0,4—1,2 м/с. Для нагрева до 1100—1200 °С установлены два ряда индукционных нагревателей производительностью 4 т/ч. Длина бочки валков 200 мм.

Третья клеть может работать как с горизонтальным, так и с вертикальным расположением валков. Клети — бесстанинного типа, на подшипниках качения. Перед первой клетью установлено задающее устройство, позволяющее проводить прокатку при повышенных углах захвата.

Такой же стан 300 установлен на Омутнинском металлургическом заводе. Впоследствии с целью перехода на единую заготовку сечением 52 × 52 мм стан подвергся реконструкции с добавлением линейной чистовой группы из трех трехвалковых клетей 280 (рис. 3, *д*), ножниц для резки фасонного профилей и нагревательной методической печи с шагающим подом.

Производство фасонных профилей специального назначения обычной и высокой точности получило широкое развитие как в нашей стране, так и за рубежом. Наиболее развитые в техническом отношении капиталистические страны имеют довольно широкий сортамент.

Так, например, фирма «Швертер» (ФРГ) освоила [16] производство около 15 тыс. типоразмеров горячекатанных, прессованных и холоднотянутых фасонных профилей специального назначения. Фирма поставляет профили как в готовом виде, так и в виде заготовок для последующего волочения или механической обработки. Методом горячей прокатки изготавливают специальные фасонные профили обычной точности, сравнительно простые по форме. Фирма «Швертер» имеет специализированный четырехклетевой стан 400 (рис. 3, *е*) производительностью 20 тыс. т в год. Заготовка сечением 70 × 70 — 200 × 200 мм и длиной 5—7,5 м нагревается в методической печи. В обжимной реверсивной клети 600 осуществляется от 3 до 11 проходов. Валки — на подшипниках качения.

На рис. 4 приведены некоторые профили, выпускаемые фирмой «Швертер». Масса на 1 м длины профилей, поставляемых фирмой, находится в пределах 0,4—50 кг, диаметр окружности, описанной вокруг профиля, не превышает 140 мм, а ширина плоских профилей — не более 210 мм. Горячекатанные профили изготавливаются со следующими отклонениями от nominalных размеров: максимальные габаритные размеры по перечного сечения профиля, мм: до 25; 25—75; 75—100; 100—



Рис. 4. Фасонные профили
фирмы «Швертер» (ФРГ).

125; свыше 125; соответственно предельные отклонения, мм: ±0,5; ±0,8; ±1,0; ±1,2; ±1,4.

При калибровке горячекатанных заготовок (подкатов) следует учитывать форму поперечного сечения профиля и требования к точности размеров, а также объем заказываемой партии профиля и технические возможности стана.

Характерным для производства малотоннажных партий горячекатанных фасонных подкатов является стремление к уменьшению числа фасонных калибров, количество которых обычно 2—4 и только в отдельных случаях для профилей высокой сложности применяют 5 калибров.

В специализированных цехах по производству точных профилей для горячей прокатки малотоннажных партий фасонных заготовок под последующую холодную обработку используют прокатные станы различных типов. На небольших предприятиях с малым объемом производства профильных подкатов широко применяют одноклетевые станы горячей прокатки.

Так, в ЧССР на заводе им. Ю. Фучика с годовым объемом производства фасонных заготовок около 200 т [7] применяется одноклетевой стан дуо 300. Исходный материал — круглые прутки диаметром до 45 мм и длиной 2—3 м. Скорость прокатки 1 м/с, подкат получают на одной паре валков, вытяжки по проходам — от 1,3 до 1,6. Стан оборудован камерной нагревательной печью.

В CPP на предприятии «Энергорепараций» прокатывают профили для турбинных лопаток на одноклетевом стане дуо 300. Горячая прокатка проводится за три прохода с коэффициентом вытяжки за пропуск 1,3—1,6.

Прокатный цех фирмы «Лейстриц» (ФРГ) имеет четыре одноклетевых стана дуо 300 для горячей прокатки фасонных заготовок турбинных лопаток из круглых заготовок. Прокатку осуществляют за несколько проходов со значительными лампасами по тонкой кромке, которые обрезаются затем в специальной волоке.

Основным недостатком одноклетевых станов является невозможность точной прокатки сложных фасонных подкатов так как все калибры размещены на одной бочке, поэтому невозможно раздельно по калибрам осуществлять настройку калибровки. Кроме того, из-за низкой механизации труда станы не отвечают требованиям современного уровня производства.

На сталепрокатном заводе в г. Кладно (ЧССР) для горячей прокатки фасонных подкатов используется [7] стан 340 линейного типа, состоящий из обжимной трехвалковой клети с диаметром валков 430 мм и чистовой линии из пяти трехвалковых клетей с диаметром валков 340 мм. Исходная заготовка квадратного сечения — от 60 × 60 до 80 × 80 мм и длиной до 1,6 м. Нагрев осуществляется в камерной газовой печи. Скорость прокатки в обжимной клети — 2,8 м/с, на чистовой линии — 4 м/с. На стане прокатываются полосовые профили шириной до 100 мм и фасонные профили с массой 6—8 кг на 1 м длины. Допуски на размеры — до 1 мм.

Горячекатаные фасонные профили и подкаты для последу-

ющего волочения фирма «Швертер» (ФРГ) производит на линейных станах 250 и 300, на которых прокатывается до 20—25 тыс. т профилей в год (в процессе работы одного стана на другом производится перевалка). На стане 250 — обжимная трехвалковая клеть с диаметром валков 380 мм и чистовая линия, состоящая из семи трехвалковых клетей с диаметром валков 250 мм. В каждой клети чистовой линии осуществляется только один проход. Исходная заготовка — сечением 50 × 50 мм, длиной 0,2—2,5 м. Скорость прокатки — до 4,2 м/с. Подшипники валков — текстолитовые. В обжимной клети выполняются три или пять проходов. Количество фасонных калибров — от трех до пяти. Процесс горячей прокатки осуществляется со смазкой — эмульсией на базе битума. Точность профилей по толщине ±0,3 мм. Для получения точных размеров и выполнения отдельных элементов некоторые профили прокатываются с заусенцами, которые удаляются вручную при помощи шлифовальных кругов.

На основании анализа калибровок фасонных профилей и подкатов специального назначения можно сформулировать основные принципы проектирования прокатных станов горячей прокатки для цехов, специализированных по производству фасонных профилей высокой точности:

1. Прокатка широкого сортамента профилей за 3—4 фасонных прохода по принципу «в каждой клети один проход».

2. Возможность деформации раската в первом фасонном калибре с обжатиями в 2—4 раза большими, чем в последующих калибрах.

3. Формирование в обжимной клети широкого диапазона простых сечений (квадрат, прямоугольник, ромб, овал) из минимального количества типоразмеров исходной заготовки.

4. Возможность создания в условиях непрерывной прокатки чередования горизонтального и вертикального расположения валков.

5. Возможность установки четырехвалковых клетей взамен любой клети чистовой группы.

Исходя из этих требований в отраслевой лаборатории прокатки Днепродзержинского индустриального института разработаны схемы расположения оборудования стана 500/350 для прокатки широкого сортамента фасонных профилей и подкатов сечением 500—5000 мм² (рис. 5) и стана 350/250 для прокатки фасонных профилей и подкатов сечением 50—500 мм²

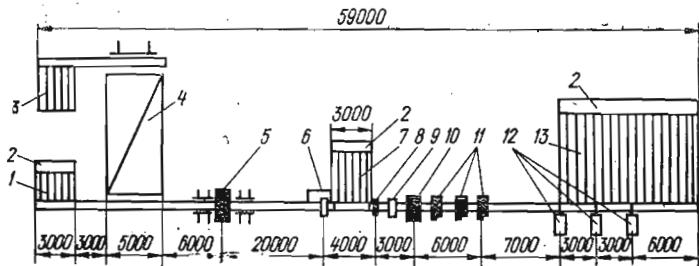


Рис. 5. Схема стана 500/350:

1 — решетка для возврата; 2 — карман; 3 — загрузочная решетка; 4 — нагревательная печь; 5 — обжимная реверсивная клеть; 6 — ножницы; 7 — стеллаж; 8 — опускающийся упор; 9 — кантователь; 10 — двухвалковая клеть 500; 11 — комбинированные (четырехвалковые) клети 350; 12 — пилы; 13 — холодильник.

(рис. 6) из бунтового металла. Эти станы предназначены для цеха фасонных профилей Череповецкого сталепрокатного завода.

Холодная прокатка фасонных профилей в двухвалковых клетях имеет те же особенности, что и горячая. Однако технология холодной прокатки имеет [23] ряд отличий от горячей прокатки. В качестве заготовки используют сортовой прокат (круг, квадрат, полосу) или горячекатаный и прессованный фасонный подкат. Слой окалины с горячекатаной заготовки удаляют посредством травления или пескоструйной обработки. Суммарное обжатие при холодной прокатке фасонных профилей зависит от марки прокатываемого металла, сечения и конфигурации профиля, условий захвата, конструкции стана и т. д. Обжатие обычно за пропуск составляет 10—25 %. В про-

цессе холодной деформации происходит интенсивное выделение тепла. Поэтому прокатные валки охлаждают эмульсией, машинными маслами и т. п. Скорость прокатки зависит от типа стана, его сортамента и составляет на линейных станах 0,2—1,0 м/с, на непрерывных — до 10 м/с. Для получения фасонных профилей с заданными механическими свойствами, а также для дальнейшей качественной обработки фасонных профилей необходимы промежуточные отжиги с последующим

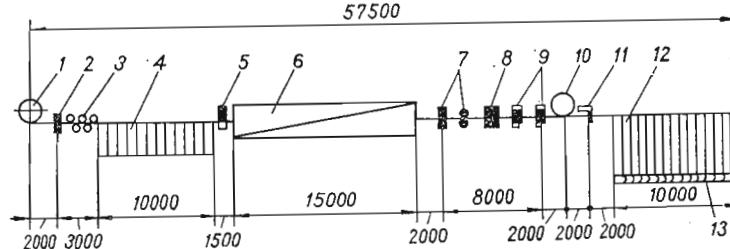


Рис. 6. Схема стана 350/250:

1 — размыватель; 2 — тянувшие валки; 3 — роликоправильная машина; 4 — загрузочная решетка; 5 — обрывные ножницы; 6 — индукционная печь; 7 — черновые клети 250; 8 — клеть 350; 9 — комбинированные (четырехвалковые) клети 250; 10 — моталка; 11 — летучие ножницы; 12 — холодильник; 13 — карман.

травлением. Однако периодичность операций отжиг — травление снижается по сравнению с волочением в 2—5 раз.

Конструкция и технология изготовления валков для станов горячей и холодной прокатки аналогичны, но при холодной прокатке значительно чаще применяют бандажированные валки из хромовольфрамовых и хромоникелевых сталей, сталей типа 9Х, 9ХС или твердых сплавов. Профиль калибра, твердость поверхности которого по Шору равна 80—85, обычно шлифуется. Стойкость калибра за одну постановку — 5—20 т. Число перешлифовок — 10.

При холодной прокатке точность профиля по высоте 0,01—0,05 мм для непрерывных и одноклетевых станов, специализированных для производства фасонных профилей, и 0,1—0,15 мм для линейных двухвалковых станов, точность по ширине —

0,1—0,3 мм для станов любого типа. Преимущество холодной прокатки фасонных профилей заключается в наибольшей среди других способов холодной деформации производительности.

Стоимость стальных фасонных профилей высокой точности в зависимости от качества профиля и массы партии, технологии прокатки, вида исходной заготовки и других причин может изменяться в значительной степени — от 180 до 5000 р./т.

ГЛАВА

2

ПРОКАТКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРОВ

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРОВ

В связи с быстрым развитием машиностроения и других отраслей промышленности постоянно возрастаает потребность в новых профилях из различных металлов и сплавов, производство которых традиционными методами прокатки, волочения или прессования оказывается весьма трудоемким, а в ряде случаев и невозможным.

Исследования, выполненные Магнитогорским горно-металлургическим и Челябинским политехническим институтами, позволили разработать ряд новых направлений и способов эффективного применения многовалковых калибров в различных процессах обработки металлов давлением для улучшения качества изделий, создания новой и совершенствования действующей технологии [23; 25]. Поэтому не случаен повышенный интерес к многовалковым калибрам, в том числе и четырехвалковым. В нашей стране и за рубежом разрабатываются новые технологические схемы и конструкции клетей с многовалковыми калибрами.

При обжатии прокатываемой полосы в четырехвалковом калибре обуславливается деформация основного объема металла по схеме напряженного состояния всестороннего сжатия при наличии деформационной схемы истечения. Такая

схема деформации повышает пластические свойства обжимаемого металла и дает возможность осуществлять пластическую деформацию малопластичных сталей и сплавов прокаткой вместо трудоемких процессов ковки или прессования. Отсутствие уширения практически по всему объему очага деформации при прокатке в четырехвалковых калибрах способствует значительному увеличению коэффициента вытяжки за проход, что дает возможность уменьшить число рабочих клетей на стане в 1,5—2 раза по сравнению с действующими станами с двухвалковыми калибрами.

Повышение предела пластичности при деформации металла в многовалковом калибре по сравнению с пределом пластичности, достигаемым при прокатке в двухвалковых калибрах,



Рис. 7. Профили, прокатываемые с использованием четырехвалковых калибров.

позволяет вести холодную прокатку малопластичных материалов с высокими скоростями и большими обжатиями.

Деформация в четырехвалковых калибрах осуществляется в условиях, принципиально отличающихся от условий деформации в двухвалковых калибрах, в которых при прокатке по мере продвижения металла по очагу деформации высота полосы уменьшается, а ширина увеличивается. При всестороннем обжатии в четырехвалковом калибре ширина и высота прокатываемой полосы уменьшаются одновременно, при этом создаются благоприятные условия деформирования по всему периметру обрабатываемого сечения. При использовании четырехвалковых калибров возможно прокатывать сложные профили с параллельными наружными гранями, а также получать на боковых наружных гранях продольные пазы и выступы различной конфигурации, что практически невозможно выполнять с помощью двухвалковых калибров (рис. 7).

Четырехвалковый калибр по сравнению с аналогичным по форме двухвалковым имеет значительно меньшие врезы (ручьи) в валках. Поэтому неравномерность окружных скоростей в четырехвалковых калибрах значительно меньше, чем в двухвалковых, а следовательно, меньше износ рабочих валков и лучше качество поверхности.

Исследования формоизменения круглых заготовок при горячей прокатке за один проход в четырехвалковых двутавровых калибрах с фланцами различной конфигурации показали возможность очень резкого изменения формы исходного сечения и хорошее заполнение различных выступов и впадин с малыми радиусами закруглений, что практически невозможно в двухвалковых калибрах. Особенно следует отметить, что при весьма значительном формоизменении исходного сечения за один проход не обнаружено каких-либо нарушений сплошности металла на внешней поверхности прокатываемых профилей.

В отличие от прокатки в двухвалковом калибре, при обжатии в четырехвалковом калибре наблюдается, как правило, утяжка металла по разъемам калибра, что позволяет в случае необходимости производить значительные обжатия без опасения переполнения калибра.

В целом прокатка в клетях с многовалковым калибром привлекает внимание специалистов по двум причинам: во-первых, возможностью получения сложных фасонных профилей с высокой точностью формы и размеров и, во-вторых, возможностью прокатки как малопластичных металлов и сплавов, так и очень пластичных.

Наряду с известными преимуществами четырехвалковые клети имеют ряд недостатков. Они сложнее конструктивно, менее удобны в настройке и эксплуатации. По мере износа калибра в двухвалковой клети можно использовать соседний калибр, а в четырехвалковой клети необходимо менять весь комплект валков. Продолжительность перевалки валков и настройки четырехвалковой клети значительно больше, чем сортовой клети дуо.

Несмотря на указанные недостатки, применение четырехвалковых калибров при прокатке ряда сортовых профилей экономически целесобобразно.

ПРОКАТКА ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Первое практическое применение четырехвалковые калибры получили при горячей прокатке двутавровых профилей. Известно, что процесс прокатки во фланцевых двухвалковых калибрах является весьма сложным и трудоемким, особенно при прокатке тонкостенных широкополочных балок больших размеров без уклона на внутренних и внешних поверхностях полок.

Необходимость прокатки двутавров большой высоты с тонкой стенкой и широкими полками без уклонов привела к разработке стана нового типа, в основу которого заложено использование четырехвалковых калибров. При прокатке двутавров в четырехвалковых клетях за счет изменения настройки рабочих валков появилась возможность получать профили с различной толщиной стенок и полок. На станах обычных типов для прокатки каждого профилеразмера двутавра требовались свои валки и калибры, что существенно сдерживало развитие сортамента этого вида проката. Станы с четырехвалковыми клетями для производства двутавровых профилей широкого сортамента в отличие от станов с клетями дуо или трио получили название универсальных балочных станов, а установленные на них четырехвалковые клети — универсальных клетей.

Несмотря на более высокую стоимость, двутавры с широкими и параллельными полками стали широко применять в промышленном и гражданском строительстве, так как при одинаковом моменте сопротивления масса новых двутавров уменьшилась на 15—20 % по сравнению с массой обычных балок, прокатываемых на станах с клетями дуо и трио. Кроме того, трудоемкость изготовления металлоконструкций из двутавров

с широкими и параллельными полками снизилась в среднем на 60 % по сравнению с трудоемкостью изготовления сварных и клепаных конструкций из обычных профилей.

Высокая эффективность способа прокатки двутавровых профилей с широкими и параллельными полками в четырехвалковых клетях с открытыми калибрами способствовала быстрому его распространению. В настоящее время он является основным способом производства этого вида металлопроката. На универсальных балочных станах могут прокатываться широкополочные двутавры высотой от 150 до 1100 мм и соответственно с шириной полок от 100 до 450 мм.

В настоящее время большинство балочных станов модернизировано, что существенно расширило сортамент продукции. Поэтому чисто балочными станами их теперь можно назвать лишь условно. На самом деле в сортамент таких станов входят симметричные и несимметричные фасонные профили, двутавровые балки, швеллеры, рельсы, шпунтовые профили и т. д.

Четырехвалковые калибры используются уже длительное время при прокатке профилей общего назначения и, в первую очередь, двутавровых балок и швеллеров. Освоение в Японии принципиально новых типов профилей связано с теоретическими исследованиями процесса прокатки в четырехвалковых калибрах, начало которых относится к 1965 г. [11]. При этом исследовали процесс прокатки двутаврового балочного профиля, швеллера, рельса, шпунтового профиля и т. д. После разработки теоретических основ прокатки была освоена технология прокатки таких профилей в универсальных клетях. Так, например, фирма «Ниппон Стил» разработала профиль для колонн коробчатого типа. Колонна состоит из двух швеллеров с параллельными полками, образующими после сварки замкнутый профиль. Особенностью профиля является прямоугольная форма кромок полок, равная толщине полок и стенки, наличие выступов по наружным углам профиля и соотношение высоты полки и стенки профиля, что позволяет получать квадратный поперечный профиль и обеспечивает равную жесткость

колонны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В 1972 г. на универсальном балочном стане в г. Хирохата начато массовое производство таких профилей. Было наложено серийное производство колонн двух размеров — с поперечным сечением 400×400 и 500×500 мм, в каждой серии по 11 типоразмеров колонн с толщиной стенки 13—50 мм.

Особенностью нового сортопрокатного стана (Польская Народная Республика) [11] является высокая производительность, составляющая 1,2 млн. т проката в год, высокий уровень механизации и автоматизации производственных процессов. Заготовки сечением не более 250×200 мм нагреваются в двух нагревательных печах производительностью 180 т/ч каждая. В состав оборудования стана входят три реверсивные клети дуо, группа универсальных черновых клетей и универсальная чистовая клеть. Универсальные клети — сменные и могут быть заменены клетями дуо. Максимальная скорость прокатки 9 м/с. Охлаждение ведется на пяти холодильниках с общей площадью 2000 м². На стане предусмотрен широкий сортамент проката, в том числе рельсы массой 75 кг на 1 м длины; двутавровые балки типа *HE* и *IPE* высотой до 400 и 600 мм; швеллеры, уголки, шпунты и др.

Помимо прокатки двутавровых балок и швеллеров, четырехвалковые клети стали использоваться и при прокатке железнодорожных рельсов. Так, например, в 70-х годах на Кузнецком металлургическом комбинате были проведены опыты по прокатке рельсов Р-65 с применением чистовой четырехвалковой клети. Предложенный способ прокатки обеспечивает значительное повышение механических свойств, резко уменьшает местные неровности на поверхности катания головки по длине рельса, обеспечивает лучшее выполнение профиля головки.

В 70-х годах фирма «Ниппон Стил» (Япония) освоила процесс прокатки рельсов в четырехвалковых клетях. При этом повышена точность размеров профиля рельса, снижен уровень внутренних напряжений, достигнута равномерность обжатия головки и подошвы рельса.

Фирма «Сакилор» (Франция) модернизировала рельсобалочный стан 900 для прокатки широкополочных балок высотой 180—600 мм и железнодорожных рельсов с массой 46—60 кг на 1 м длины. Для прокатки рельсов применена универсальная калибровка (рис. 8, б). По сравнению с классической калибровкой (рис. 8, а) ее особенностью является то, что вместо прокатки рельсов в закрытых калибрах двухвалковых клетей в универсальной калибровке калибры 8, 10 и 12 расположены в четырехвалковых клетях. Чистовой калибр 14 полууниверсального типа: подошва рельса деформируется вертикальным валком, а головка — в открытых ручьях горизонтальных валков.

Универсальная калибровка имеет следующие преимущества: увеличивается точность размеров рельса за счет возможности регулирования размеров калибра по мере износа ручьев; в предчистовых калибрах отсутствуют глубокие врезы в валках, что уменьшает их износ; благодаря большему обжатию подошвы и головки по высоте рельса макроструктура его лучше и механические свойства выше.

К особенностям четырехвалковых клетей, которые используются при прокатке рельсов, следует отнести применение вертикальных валков разного диаметра. При прокатке с одинаковыми диаметрами наблюдается неустойчивость процесса прокатки, искажение профиля рельсов и другие трудности. Их можно устраниить, если диаметр бочки вертикального валка со стороны головки будет меньше, чем со стороны подошвы. При этом оси вертикальных валков находятся в плоскости горизонтальных валков. Соотношение диаметров бочек вертикальных валков должно быть таким, чтобы точки начала дуги захвата металла для обоих вертикальных валков лежали в плоскости, параллельной оси валков.

Четырехвалковые клети широко используются на рельсобалочных и крупносортных станах при прокатке двутавровых балок как с параллельными полками [18], так и с уклоном внутренних граней полок [24]. При этом возможны технологические схемы с одной или двумя универсальными клетями.

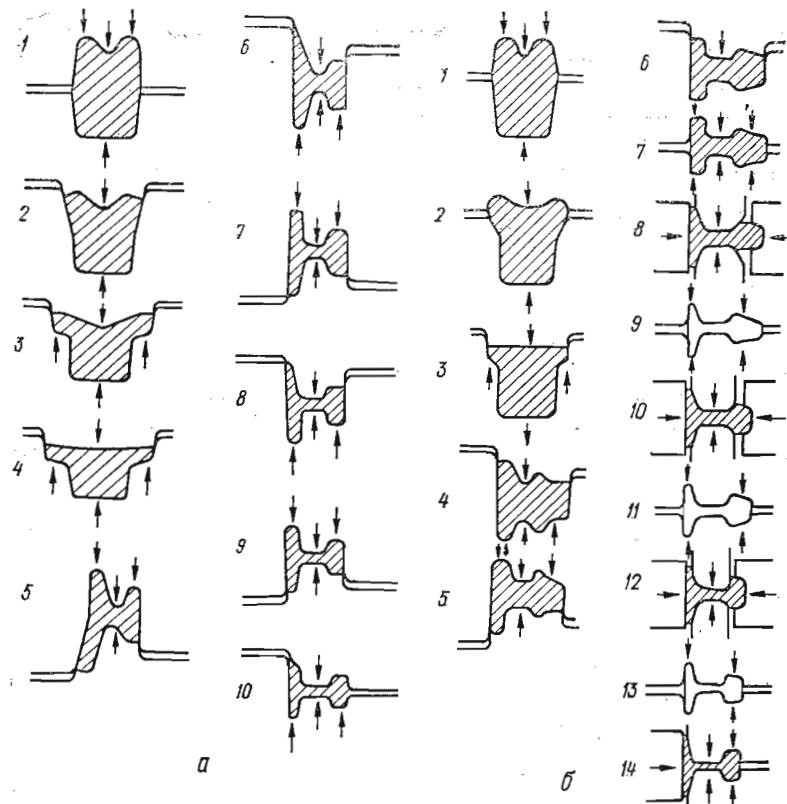


Рис. 8. Схемы прокатки железнодорожных рельсов.

В качестве контрольных могут быть использованы калибры полуузакрытого типа или же калибры, симметричные относительно продольной — горизонтальной плоскости с разъемом посередине.

При прокатке балок с параллельными полками [18] с применением одной универсальной клети контрольный калибр

полузакрытого типа имеет то преимущество, что в нем, как и в обычном балочном калибре, полки обжимаются по ширине наряду с обжатием их по высоте. Но износ такого калибра значительно выше, чем симметричного. Поэтому выбор типа контрольного калибра необходимо увязывать с условиями прокатки в предыдущей и последующей универсальных клетях.

Так как симметричный контрольный калибр не уменьшает толщины и уклонов внутренних граней полок, то внутренний уклон полок из предыдущего калибра не должен превышать 3,5—4 %. Такие малые уклоны в предыдущих калибрах существенно снижают их стойкость. Опыт прокатки балки № 16 с симметричным или полузакрытым контрольным калибром подтверждает эти выводы. Так, при применении симметричного контрольного калибра и предыдущего по ходу калибра с малым уклоном закрытой полки (наружным 2 и внутренним 2,7 %) стойкость этого калибра составила 350 т. При использовании калибра полузакрытого типа и предыдущего калибра с уклонами закрытой полки 2 и 7 % стойкость калибра увеличилась до 1400 т.

При применении схемы прокатки с двумя универсальными клетями стойкость валков универсальных клетей повышается, в особенности чистовой клети, так как износ боковых поверхностей горизонтальных валков будет более равномерным. Одновременно должна возрасти и стойкость контрольного калибра, в котором внутренний уклон полок можно увеличить до 6—8 %, поскольку переход к уклону чистового калибра будет осуществляться в двух универсальных клетях. Для увеличения стойкости валков предчистовой универсальной клети следует увеличить уклон граней полок: наружный — до 10 и внутренний — до 15.

ПРОКАТКА МЕЛКОСОРТНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Несмотря на целый ряд преимуществ деформации металла в четырехвалковых калибрах перед прокаткой в клетях с двухвалковыми калибрами, она не нашла еще должного распространения при горячей прокатке средне- и мелкосортных фасонных сортовых профилей. Объясняется это отсутствием компактных и надежных четырехвалковых клетей, вписывающихся в схему расположения основного технологического

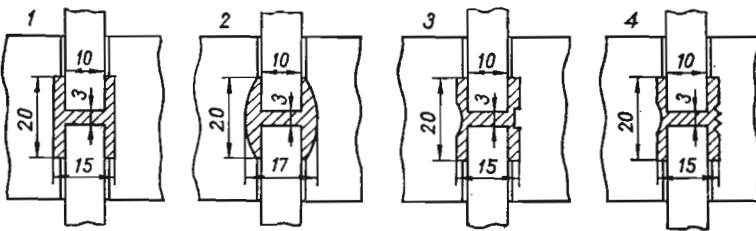


Рис. 9. Четырехвалковые калибры двутавровой формы.

оборудования действующих средне- и мелкосортных станов, а также достаточно обширных с прикладной точки зрения данных о технологических особенностях пластической деформации сортовых фасонных профилей в многовалковых калибрах.

С целью определения возможности формоизменения в четырехвалковых калибрах сложной двутавровой формы (рис. 9) были проведены исследования прокатки на полупромышленном стане 300 за один или два прохода в различных калибрах. Четырехвалковые калибры были образованы двумя горизонтальными валками диаметром 300 мм и двумя неприводными вертикальными валками диаметром 90 мм. В качестве исходной заготовки использовались стальные образцы круглого и двутаврового сечений различных размеров. Температура прокатки составляла 950—1000 °C.

В процессе исследований при формоизменении заготовки диаметром 16 мм в калибре 2 (рис. 9) за один проход получали

профиль двутавровой формы с шириной полукруглых полок 16 и 18 мм. При обжатии той же самой заготовки за два прохода (вначале в калибре 1, а затем в калибре 4) получали довольно сложный тонкостенный двутавровый профиль с продольными пазами на внешних гранях полок (рис. 10, а).

При формоизменении заготовки диаметром 18 мм в калибре 2 за один проход был получен асимметричный профиль с

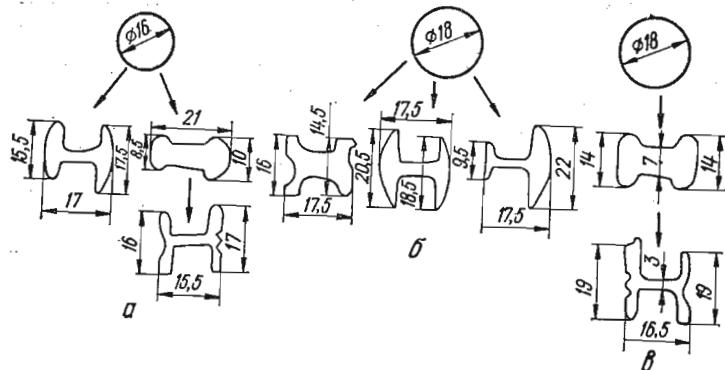


Рис. 10. Обводки темплетов полос, прокатанных в четырехвалковом калибре за один проход.

полукруглыми полками шириной 22 и 9,5 мм, а также сложный двутавровый профиль с размерами сечения $16 \times 17,5$ мм (рис. 10, б). Разница в ширине полок достигнута за счет смещения вертикальных валков в горизонтальном направлении.

Из заготовки диаметром 18 мм за два прохода (калибры 1 и 4) был прокатан асимметричный фасонный профиль двутавровой формы с фигурными продольными пазами на внешних гранях полок. При толщине стенки 3 мм получены весьма тонкие полки высотой 19 мм (рис. 10, в).

Были проведены и другие исследования при различных комбинациях двутавровых калибров.

Исследования формоизменения металла при обжатии за

один проход в четырехвалковых двутавровых калибрах подтвердили возможность очень резкого изменения формы исходного сечения и хорошее заполнение различных выступов и впадин с малыми радиусами закруглений на наружных боковых гранях, что практически невозможно в двухвалковых калибрах.

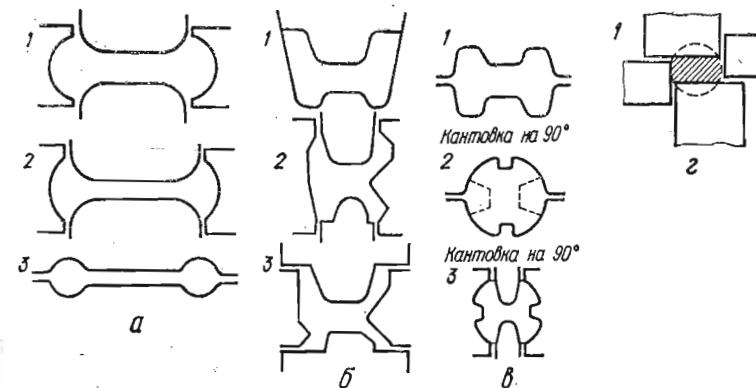


Рис. 11. Схемы прокатки фасонных профилей с применением четырехвалковых калибров.

Особенно следует отметить, что при весьма значительном формоизменении исходного сечения за один проход в четырехвалковых калибрах не обнаружено каких-либо нарушений сплошности металла на внешней поверхности прокатываемых профилей.

Исследования в области производства фасонных профилей высокой точности показывают, что прокатку можно применять не только для чернового формоизменения заготовки, но и в качестве чистовой или отделочной операции для получения готовой продукции. В связи с этим применение четырехвалковых калибров еще более расширяет сортамент профилей высокой точности, которые могут быть получены непосредственно прокаткой.

На рис. 11 приведены схемы прокатки некоторых фасонных профилей специального назначения с применением четырехвалковых калибров в качестве формирующих, черновых и чистовых проходов.

На прокатных станах с двухвалковыми клетями профиль для дверных петель автомобилей обычно прокатывается [12] в 7—9 фасонных калибрах, причем толщина исходного прямоугольного сечения, задаваемого в первый фасонный калибр, превышает толщину утолщений готового профиля в 5—7 раз. Только на непрерывном стане 300 Череповецкого сталепрокатного завода профиль шириной 114 мм для дверной петли автомобиля «Москвич» из круглой заготовки диаметром 60 мм прокатывается за четыре прохода.

При применении четырехвалковых калибров для прокатки профилей с утолщениями на краях количество фасонных калибров может быть уменьшено до трех (рис. 11, а). Соответствующие исследования были проведены на двухвалковом полупромышленном стане 300 при прокатке профилей для дверных петель с размерами $70 \times 6 \times 15$ мм и $110 \times 6 \times 15$ мм. Диаметры вертикальных валков составляли для калибра 1 — 109 и 118 мм, для калибра 2 — 114 и 123 мм соответственно для узкого и широкого профиля. Радиус ручьев вертикальных валков был равен 16,5 мм. Толщина исходных образцов из Ст3 составляла 18—22 мм. Обжатие вертикальными валками изменялось в пределах 2—31 мм в калибре 1 и было постоянным (5 мм для узкого и 10 мм для широкого профиля) в калибре 2.

Комплекс проведенных исследований подтвердил целесообразность применения данной схемы в три прохода с двумя четырехвалковыми калибрами для прокатки профилей с утолщениями на краях. При этом необходимая высота исходного подката прямоугольного сечения превышает не более чем в 1,3—1,4 раза высоту утолщений готового профиля.

На рис. 11, б приведена схема прокатки фасонного профиля для шины табулятора в три прохода с предчистовым и чистовым четырехвалковыми калибрами из заготовки круглого

сечения диаметром 19 мм на полупромышленном стане 300. Особенность этого профиля заключается в том, что его вообще нельзя получить путем горячей прокатки в двухвалковых клетях. Прокатка же в четырехвалковых калибрах целесообразна и эффективна.

Прокатка крестообразного профиля (рис. 11, в) при применении четырехвалкового калибра в качестве чистового также может быть осуществлена за три прохода.

Особый интерес представляет прокатка профилей прямоугольного сечения за один проход в четырехвалковом калибре (рис. 11, г) из круглой заготовки. За счет смещения горизонтальных и вертикальных валков из одной и той же заготовки могут быть получены прямоугольные профили различных размеров. Опыты по такой схеме были проведены на полупромышленном стане 300.

Исследования технологии прокатки большого числа фасонных профилей в клетях с многовалковым калибром выполнены на прокатных станах конструкции Челябинского политехнического института [23]. Марочный сортамент включал свыше 25 марок сталей и сплавов, в том числе быстрорежущие стали и труднодеформируемые цветные сплавы. При исследовании было установлено, что горячей прокаткой из заготовок простого сечения за один-два прохода можно получать ряд довольно сложных фасонных профилей (с точки зрения их прокатки в двухвалковых калибрах). При прокатке двутаврового профиля за один проход из круглой заготовки значительная неравномерность деформации не повлияла на заполнение калибра из-за обжатия полок вертикальными валками, которое компенсировало уширение и утяжку полок. Профиль для шлицевого вала $6 \times 11 \times 14$ мм под последующее волочение был получен за два прохода из круглой заготовки диаметром 16 мм. Прокатка профиля для шлицевого вала показала, что в клетях с многовалковым калибром сравнительно просто (по сравнению с волочением) получается профильный подкат под последующее чистовое волочение. При этом в четырехвалковом калибре можно прокатывать профили для шлицевых валов с

числом осей симметрии, кратным не только четырем, но и трем.

Исследована также прокатка в четырехвалковом калибре ряда крестообразных профилей [23], которая показала возможность получения профилей с толщиной стенки до 0,8—1,5 мм за один проход. Следует отметить, что тонкостенные профили с помощью горячего прессования получать трудно, а волочение таких профилей — очень трудоемкий и малоприводительный способ.

Другой областью использования клетей с четырехвалковыми калибрами для получения симметричных профилей и катанки высокой точности является применение отделочного блока за чистовой группой действующих сортовых и проволочных станов горячей прокатки.

Положительные результаты были получены при промышленных испытаниях на мелкосортном стане 250 № 1 Магнитогорского металлургического комбината двухклетевого блока с четырехвалковыми калибрами, установленного в линию стана за чистовой клетью. В двухклетевой блок подавался круглый подкат диаметром 16 мм, получаемый из двенадцатой клети стана без изменения технологии его работы. Формирование готового круглого профиля осуществлялось по схеме: исходный круг диаметром 16 мм — квадрат с закругленными углами — круг диаметром 14 мм. Несмотря на значительные колебания размеров поперечных сечений исходного круга (овальность достигла 1,04 мм, а отклонения размеров по длине раската — 0,7 мм), в блоке получен чистовой профиль с максимальным отклонением $\pm 0,1$ мм от номинального размера [25].

При производстве стальных фасонных профилей высокой точности на заключительных формообразующих операциях наряду с волочением в последние годы получает все большее применение холодная прокатка в многовалковых калибрах. Развитие этого способа связано с необходимостью расширения сортамента фасонных профилей высокой точности и снижения трудоемкости их производства в результате уменьшения доли волочения в монолитных волоках.

Холодная прокатка в клетях с многовалковым калибром обеспечивает экономию металла и трудозатрат благодаря ликвидации весьма трудоемкой операции остриения передних концов и термической обработки, позволяет получать тонкостенные фасонные профили высокой точности, получение которых волочением в монолитных волоках представляет значительные трудности.

Конструктивные решения прокатных клетей с четырехвалковым калибром [23] позволяют применять их для холодной прокатки фасонных профилей, вписывающихся в круг диаметром до 30 мм.

Из анализа сортамента фасонных профилей высокой точности следует, что около 10 % профилей целесообразно получать холодной прокаткой в многовалковых калибрах.

Процесс производства проволоки из высокоуглеродистых и легированных сталей и сплавов способом волочения в монолитных волоках характеризуется повышенной трудоемкостью, жесткими границами температурно-скоростных условий, низкими частными и суммарными обжатиями, применением дорогостоящих материалов и оборудования. Для снижения сопротивления пластической деформации исходная катанка и промежуточная заготовка из большинства легированных сталей подвергаются дополнительным операциям термической обработки и подготовки поверхности, часто длительным по времени и требующим значительных трудовых и капитальных затрат.

В настоящее время разработаны и внедряются технология и оборудование пятиклетевого стана с четырехвалковыми калибрами для холодной и теплой прокатки проволоки из легированных сталей и сплавов.

Исследования показали [25], что после холодной деформации на трехклетевом стане с четырехвалковыми калибрами по схеме квадрат — восьмиугольник — круг из исходной заготовки $9,35 \times 9,45$ мм диаметр полученного готового круглого профиля в двух взаимно перпендикулярных направлениях изменялся в пределах от 8,84—8,86 до 8,89—8,92 мм. Изменение диаметров по всей длине калиброванного прутка круг-

лого сечения не превышало 0,1 мм. Полученный профиль по точности размеров относится к четвертому классу для калиброванной стали. Максимальная высота неровностей профилей составляла в среднем 2,25 мкм, а для валков — в среднем 2,0 мкм, что соответствует в обоих случаях пятому классу чистоты поверхности.

Применение холодной прокатки взамен волочения исключает операции желтения, известкования и запрессовки прутков. Потери металла на обрезь уменьшаются в 2—3 раза, стоимость передела калиброванной стали, полученной путем холодной прокатки, уменьшается почти вдвое, производственная площадь сокращается на 20 %, число производственных рабочих — в 1,5—2 раза.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОФИЛЕЙ, ПРОКАТЫВАЕМЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРОВ

Сортамент профилей отраслевого и специального назначений насчитывает более 2 тыс. горячекатанных профилей, а также свыше 4 тыс. сортовых и фасонных профилей высокой точности, форма и размеры которых весьма разнообразны. Средняя продолжительность применения каждого профиля составляет 5—10 лет. Применение профилей отраслевого и специального назначения обеспечивает значительную экономию металла и трудозатрат у потребителя. Экономический эффект от использования таких профилей в народном хозяйстве в несколько раз выше, чем от использования сортовых профилей общего назначения.

Форма поперечного сечения многих новых профилей не имеет аналогов среди освоенных профилей. Для их прокатки требуется разрабатывать новые калибровки. Поэтому большой практический интерес представляет анализ и обобщение опыта создания и освоения калибровок профилей отраслевого назначения.

Анализ калибровок и схем горячей прокатки различных профилей в двухвалковых калибрах показывает [12], что их

можно разделить на отдельные технологические группы, которые характеризуются тем, что профили, принадлежащие к какой-либо группе, прокатывают в калибрах аналогичной формы и при прокатке и калибровке используют одинаковые методы или приемы. Каждая технологическая группа имеет свои специфические особенности прокатки. В связи с этим при разработке калибровки особенно важно правильно определить технологическую группу нового профиля.

Для большинства сортовых горячекатанных профилей общего или массового отраслевого назначения разработаны рекомендации и методы расчета калибровки профилей. Очевидно, что для уменьшения затрат при освоении новых сложных профилей отраслевого назначения возникает необходимость в решении двух задач: классификации существующего сортамента сложных профилей по методам их калибровки; разработки научно обоснованных и подтвержденных практикой методов и рекомендаций для расчета калибровок каждой технологической группы.

В соответствии с работой [16] весь сортамент профилей отраслевого назначения, получаемых с помощью продольной прокатки в двухвалковых калибрах, разделен на 19 технологических групп по принципу сходства геометрической формы поперечного сечения. Однако, хотя такая классификация весьма полезна, она не позволяет учесть все особенности прокатываемых сложных профилей и их многообразие.

Наиболее полная технологическая классификация горячекатанных профилей отраслевого назначения приведена в работе [12]. При этом весь сортамент профилей отраслевого назначения разделен на технологические группы с учетом принципов калибровки профилей и их схем горячей прокатки в двухвалковых калибрах. Для каждой технологической группы приведены типовые примеры калибровок конкретных профилей. При отнесении профиля к той или иной технологической группе учтено подобие конфигураций рассматриваемого профиля и профилей данной группы независимо от их отраслевого применения. Форма сечения и взаимное расположение

отдельных элементов профиля должны быть аналогичны форме сечения и взаимному расположению составных элементов рассматриваемой группы профилей. Элементы профиля рассмотрены, в первую очередь, в зависимости от их расположения относительно осей симметрии плоскости сечения, которая может иметь одну или две оси симметрии или же быть асимметричной. Такая классификация позволяет облегчить поиск необходимой технологической группы для нового профиля и тем самым рекомендовать для него принципиальную схему калибровки.

Предложенная классификация профилей основана на следующих положениях:

- Каждая группа включает профили аналогичной формы с размерами одного порядка.

- Симметрия профилей каждой группы одинакова (две оси симметрии, вертикальная ось симметрии, горизонтальная ось симметрии, отсутствие осей симметрии).

- Схемы калибровки профилей каждой группы имеют принципиальную общность.

- Отношение ширины профиля к его высоте в каждой группе задано в определенных пределах.

Технологические группы подобных по форме готовых профилей объединены в классы. Классификация включает 16 классов (I—XVI), которые, в свою очередь, состоят из 43 технологических групп. Распределение групп по классам представлено в табл. 4.

Выполненные исследования по прокатке сложных профилей с использованием четырехвалковых калибров показали, что применение одного-двух четырехвалковых калибров позволяет при горячей прокатке получать весьма сложные фасонные профили, которые практически невозможно прокатать в двухвалковых калибрах, а также сократить в 2—3 раза число фасонных калибров при прокатке профилей средней сложности по сравнению с их прокаткой только в двухвалковых калибрах.

Наиболее эффективно использование четырехвалковых калибров при горячей прокатке фасонных профилей с параллельными наружными гранями, с пазами и выступами различной

конфигурации на боковых поверхностях, а также профилей, у которых боковые поверхности имеют строго определенную кривизну.

Анализ сортамента горячекатанных фасонных профилей отраслевого и специального назначения показывает, что около

4. Классификация профилей по группам и классам

Класс	Название класса	Номер группы, входящей в класс
I	Полосовые с осями симметрии	1, 2
II	Полосовые клиновидные	3—6
III	Полосовые с отогнутыми краями	7
IV	Полосовые с утолщениями по краям	8—10
V	Полособульбовые	11
VI	Полосовые с ребрами жесткости	12—14
VII	С-образные	15—18
VIII	Профили с $b/h \leq 4$	19—22
IX	Тавровые и крестообразные	23—25
X	Угловые	26—28
XI	Швеллерообразные	29—31
XII	Корытообразные	32—34
XIII	Двутавровые	35—37
XIV	Рельсовые	38
XV	Зетовые	39, 40
XVI	Профили особо сложной формы	41—43

15 % профилей целесообразно производить с применением четырехвалковых калибров. Учитывая, что новые профили постоянно усложняются, использование многовалковых калибров будет расширяться.

Четырехвалковые клети имеют более сложную конструкцию по сравнению с прокатной клетью дуо или трио, вертикальные валки обычно неприводные и, как правило, с меньшей проч-

ностью и жесткостью. Поэтому клети с многовалковым калибром при горячей прокатке сортовых профилей не рекомендуется использовать в качестве вытяжных, если этот способ не единственный в данных условиях. Наиболее целесообразно использовать четырехвалковые калибры для чистовых и предчистовых проходов и только в случаях необходимости — в качестве формирующих и черновых фасонных проходов.

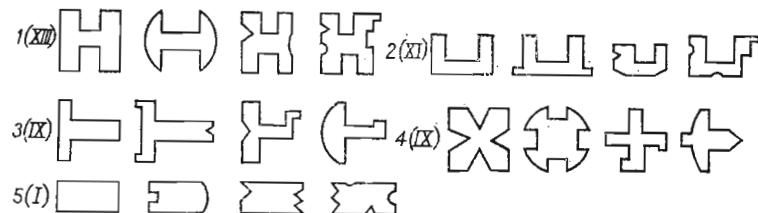


Рис. 12. Технологические группы фасонных профилей, прокатываемых с использованием четырехвалковых калибров.

Очевидно, что в условиях сортовых станов, прокатывающих широкий сортамент фасонных профилей, экономически целесообразно использовать рабочие клети дуо, которые более универсальны с точки зрения прокатки широкого сортамента, имеют меньшую продолжительность перевалки, а также четырехвалковые клети, которые позволяют получать весьма сложные профили и сокращать количество фасонных проходов при прокатке профилей средней сложности. На таких станах калибровка сложного профиля предусматривает прокатку как в двухвалковых, так и в четырехвалковых калибрах. При этом количество двухвалковых фасонных калибров в схеме прокатки значительно превышает число четырехвалковых.

На рис. 12 приведены обобщенные технологические группы фасонных профилей, прокатываемых с использованием четырехвалковых калибров. Предложенная классификация позволяет разработать для каждой группы принципиальные схемы прокатки, построить математические модели процесса прокатки и получить необходимые зависимости для расчетов

формоизменения и энергосиловых параметров, которые необходимы не только для разработки технологии, но и для проектирования кассет с заданными параметрами жесткости, точности и т. д.

Учитывая, что основная масса горячекатанных фасонных профилей, получаемых с использованием четырехвалковых калибров, будет прокатываться в двухвалковых черновых и подготовительных фасонных калибрах, обобщенные технологические группы фасонных профилей (рис. 12) следует рассматривать как дополнение к технологической классификации сложных сортовых профилей отраслевого назначения, прокатываемых с помощью только двухвалковых калибров.

Так, первая технологическая группа фасонных профилей (рис. 12) включает профили двутавровой формы сечения с полками различной конфигурации. При прокатке данных профилей четырехвалковые калибры применяются в качестве чистовых, а при прокатке весьма сложных профилей повышенной точности — и в качестве предчистового калибра. Основное же формоизменение металла в черновых и подготовительных проходах осуществляется в двухвалковых калибрах. Очевидно, что калибровка черновых раскатов двутаврового сечения, которые поступают в чистовой четырехвалковый калибр, должна соответствовать принципиальной схеме калибровки двутавровых профилей, т. е. профили этой группы по технологической классификации сложных профилей отраслевого назначения [12] при выборе принципиальной схемы калибровки соответствуют XIII классу (группы 35—37).

На рис. 12 в скобках римскими цифрами указан класс, к которому относится данная группа профилей, прокатываемых с использованием четырехвалковых калибров, в соответствии с технологической классификацией сложных профилей отраслевого назначения (см. рис. 1 и табл. 4).

ГЛАВА

3

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

ВАРИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Пусть к деформируемому в процессе прокатки телу любой формы приложена система сил. При этом массовыми силами и силами инерции ввиду их малости пренебрегаем. Спроектировав силы, действующие на элементарный параллелепипед, на оси прямоугольной системы координат $Oxyz$, после несложных преобразований получим дифференциальное уравнение равновесия:

$$\sigma_{ij,i} = 0. \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем, если не оговорено противное, $i, j = x, y, z$; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений. Для построения замкнутой феноменологической теории движения сплошной среды должна быть известна связь между динамическими и кинематическими состояниями элементарной частицы среды, т. е. связь между напряжениями и деформациями (или скоростями деформаций). Совокупность таких соотношений называется «механическими уравнениями состояния» или просто «уравнениями состояния». Так как в процессе прокатки в основном происходят большие деформации, то для определения их следует использовать теорию пластического течения, рассматривающую связь скоростей деформаций ξ_{ij} с напряжениями [8]:

$$\xi_{ij} = \lambda' \tilde{\sigma}_{ij}, \quad (2)$$

где λ' — скалярный множитель; $\tilde{\sigma}_{ij}$ — компоненты девиатора напряжений.

К уравнениям (1) и (2) необходимо добавить условие несжимаемости

$$v_{i,i} = 0 \quad (3)$$

и шесть кинематических уравнений, связывающих ξ_{ij} с компонентами вектора скорости v_i :

$$\xi_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2. \quad (4)$$

В дальнейшем ξ_{ij} при $i = j$ ($i, j = x, y, z$) обозначается через ξ_x , ξ_y и ξ_z соответственно.

Таким образом, без учета уравнения теплового баланса система основных уравнений теории пластического течения записывается в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,i} &= 0; \quad \xi_{ij} = \lambda' \tilde{\sigma}_{ij}; \\ v_{i,i} &= 0; \quad \xi_{ij} = (v_{i,j} + v_{j,i})/2 \end{aligned} \quad (5)$$

и содержит 16 уравнений с 16 неизвестными: v_i , ξ_{ij} , σ_{ij} , σ_o , где $\sigma_o = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$.

При известных граничных условиях решение (5) принципиально дает возможность определить напряженно-деформированное состояние металла при прокатке. Однако математические трудности, возникающие при этом, настолько велики, что не позволяют получить практически приемлемое решение непосредственным интегрированием системы уравнений (5). Кроме того [33], решение системы (5) для процесса прокатки сложных профилей невозможно в настоящее время из-за отсутствия достаточно точных данных о граничных условиях, т. е. условий на контактных поверхностях очага деформации.

В то же время задача интегрирования системы (5) может быть заменена равнозначной задачей, заключающейся в отыскании функции, сообщающей наименьшее значение некоторому функционалу, который выражает энергию (мощность) деформации или пропорциональную ей величину. Подобные задачи и соответствующие им уравнения называются вариационными и находят все большее применение в исследовании процессов прокатки.

Вариационное уравнение для среды объемом V с любыми механическими свойствами имеет следующий вид [8]:

$$\delta \left\{ \iiint_V \left[\int_0^H T dH \right] dV - \iint_{S_\sigma} \sigma_{ni} v_i dS \right\} = \delta N = 0, \quad (6)$$

где T , H — интенсивности касательных напряжений и скоростей деформаций сдвига; σ_{ni} , v_i — силы и скорости на поверхности деформируемого тела; S_σ — часть поверхности, на которой заданы напряжения; N — функция мощности процесса.

Вариационное уравнение (6) синтезирует в себе дифференциальные уравнения равновесия, соответствующие граничные условия и уравнения состояния среды.

В теории прокатки получила значительное развитие схема жесткопластического тела, при которой полностью преенебрегают упругими деформациями. Хотя модель жесткопластической среды менее точно по сравнению с нелинейно-вязкой средой отображает реальные свойства прокатываемого материала, однако при решении сложных задач такая идеализация свойств среды вполне приемлема и к тому же подтверждается решениями конкретных задач [33].

Для жесткопластической среды вариационное уравнение (6) преобразуется к виду [8]

$$\delta \left[\iiint_V \tau_s H dV + \iint_{S_k} \psi \tau_s \left| \vec{v}_k - \vec{v}_b \right| dS + \iint_{S_p} \left| v_t^+ - v_t^- \right| dS \right] = 0, \quad (7)$$

где τ_s — предел текучести при сдвиге; ψ — коэффициент развития контактных напряжений; S_k , S_p — поверхности контакта полосы с валками и разрыва поля скоростей; \vec{v}_k , \vec{v}_b — скорость частиц на контактной поверхности и окружная скорость валков; $|v_t^+ - v_t^-|$ — скачок скорости на поверхности разрыва.

На уравнения (6) и (7) наложено ограничение

$$N - N_{np} = 0, \quad (8)$$

где N_{np} — мощность прокатки, которое представляет собой уравнение баланса мощностей (изопериметрическое условие).

При решении вариационной задачи (6) или (7) при ограничении (8) необходимо задать кинематически возможное поле скоростей в виде, например, полиномов, неизвестные коэффициенты которых являются варьируемыми параметрами и подлежат определению.

Попытка описать поле скоростей функциями, едиными для всего очага деформации, связана [33], как правило, с практически непреодолимыми трудностями. Объясняется это резко выраженным различием в физических условиях формоизменения отдельных частей очага деформации, которое при formalизации процесса приводит к громоздким выражениям функций скоростей перемещений, контактных и свободных поверхностей, а также к уравнениям, не разрешимым приемлемыми способами. Поэтому наиболее рациональным подходом к решению задач по прокатке в калибрах является деление фактического очага деформации на активные, пассивные и переходные участки (зоны) и выбор поля скоростей отдельно для каждого участка с учетом их взаимодействия между собой. При этом на каждом из участков функции поля скоростей можно представить с помощью более простых выражений.

Математически это означает, что сложная функция какой-либо из скоростей перемещений аппроксимируется известными кривыми с соблюдением всех условий, накладываемых физическими особенностями процесса деформации. Необходимые условия сопряжения участков рассмотрены в работе [33].

Наряду с неразрывным полем скоростей, используются и так называемые разрывные решения, для которых допускаются разрывы в компонентах скоростей. При этом дополнительные мощности в плоскости разрыва учитываются в виде мощностей сил среза, как это сделано в уравнении (7) в случае модели жесткопластической среды.

В контактном слое прокатываемой полосы частицы металла перемещаются по траекториям, которые лежат на поверхности калибра. Вектор полной скорости перемещения \vec{v}_k рассматривает-

ваемой частицы расположен в плоскости, касательной к поверхности валков в той точке, где находится частица. В аналитической форме это положение записывается в виде условия непроницаемости

$$\nabla F \cdot \vec{v}_k = 0, \quad (9)$$

где ∇F — градиент поверхности калибра $F(x, y, z)$.

Обычно при решении вариационных задач процесса прокатки в калибрах систему координат $Oxyz$ располагают таким образом, что начало координат находится в плоскости выхода полосы из валков, ось Ox направлена против хода прокатки, а ось Oz является вертикальной осью. В этом случае условие непроницаемости (9) записывается в виде:

для горизонтальных валков

$$v_{zk} = v_{xk} \frac{\partial F_z}{\partial x} + v_{yk} \frac{\partial F_z}{\partial y}; \quad (10)$$

для вертикальных валков

$$v_{yk} = v_{xk} \frac{\partial F_y}{\partial x} + v_{zk} \frac{\partial F_y}{\partial z}, \quad (11)$$

где k — индекс принадлежности к контактной поверхности; F_z, F_y — уравнения поверхностей горизонтальных и вертикальных валков, разрешенные относительно z и y соответственно.

При определении кинематически возможного поля скоростей оно выбирается вначале на активном (расположенном под контактной поверхностью очага деформации) участке.

В соответствии с методом Ритца компоненты скорости v_x, v_y и v_z на активном участке могут быть представлены следующим образом [33]:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \sum_{i=0}^{n_1} A_i f_i(x, y, z); \\ v_y &= \sum_{i=0}^{n_2} B_i \Phi_i(x, y, z); \\ v_z &= \sum_{i=0}^{n_3} C_i \Psi_i(x, y, z), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где f_i, Φ_i, Ψ_i — некоторые функции от x, y, z , задаваемые с точностью до неизвестных (варируемых) параметров.

Как показывает опыт решения конкретных задач [33], для практических расчетов формоизменения и энергосиловых параметров с достаточной степенью точности можно принять

$$v_x = v_{xk} = f(x); \quad v_y = v_{yk}; \quad v_z = C_0 + C_1 z. \quad (13)$$

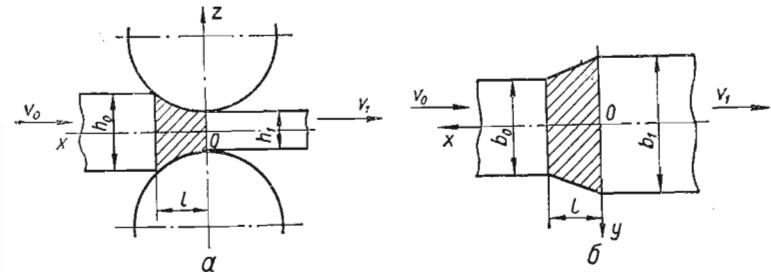


Рис. 13. Очаг деформации:
а — вид сбоку; б — вид сверху.

Принимаем, что среда жесткопластическая. Далее, задавая в соответствии с системой (12) продольную компоненту скорости v_x в виде полинома третьей степени

$$v_x = A_0 + A_1 x + A_2 x^2 + A_3 x^3 \quad (14)$$

и удовлетворяя граничным условиям (рис. 13)

$$\left. \begin{aligned} \text{при } x = 0: \quad v_x &= -v_1; \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} = 0; \\ \text{при } x = l: \quad v_x &= -v_0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

получаем

$$v_x = -a_1 v_b \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^3}{l^3} \right], \quad (16)$$

где v_b — окружная скорость валков; $a_1 = v_1/v_b$ — коэффициент опережения; $\lambda = v_1/v_0$ — коэффициент вытяжки.

Для вертикальной компоненты скорости v_z ограничиваемся в соответствии с формулами (13) линейным приближением.

Удовлетворяя граничным условиям

$$\text{при } z = F_{z_1}: v_z = v_{zk_1}; \quad \text{при } z = F_{z_2}: v_z = v_{zk_2}, \quad (17)$$

имеем

$$v_z = v_{zk_1} - \frac{v_{zk_1} - v_{zk_2}}{F_{z_2} - F_{z_1}} (z - F_{z_1}), \quad (18)$$

где 1, 2 — индекс верхнего и нижнего валков соответственно.

Если же очаг деформации симметричен относительно продольно-горизонтальной плоскости (рис. 13), то $v_{zk_2} = -v_{zk_1}$ и $F_{z_2} = -F_{z_1}$. Тогда из уравнения (18), если обозначить $v_{zk_1} = v_{zk}$ и $F_{z_1} = F_z$, следует

$$v_z = (v_{zk}/F_z) z. \quad (19)$$

Из (18) и (19) находим скорость относительного удлинения:

$$\xi_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{(v_{zk_1} - v_{zk_2})}{F_{z_2} - F_{z_1}}; \quad (20)$$

$$\xi_z = \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{v_{zk}}{F_z}. \quad (21)$$

Дифференциальное уравнение для определения v_y получим из равенства (3) при использовании выражений (20) и (13):

$$v_y = \frac{1}{F_{z_2} - F_{z_1}} \left\{ \varphi(x) - \int \frac{\partial}{\partial x} [v_x (F_{z_2} - F_{z_1})] dy \right\}, \quad (22)$$

или, если калибр симметричен относительно продольно-горизонтальной плоскости (см. рис. 13), то для верхней половины очага деформации с уравнением поверхности валка F_z имеем

$$v_y = \frac{1}{F_z} \left\{ \varphi(x) - \int \frac{\partial}{\partial x} (v_x F_z) dy \right\}. \quad (23)$$

Скорости относительных сдвигов определяются из выражения (4) при $i \neq j$. При составлении вариационного уравнения (7)

$$H = \frac{2}{\sqrt{6}} V \sqrt{(\xi_x - \xi_y)^2 + (\xi_y - \xi_z)^2 + (\xi_z - \xi_x)^2 + 6(\xi_{xy}^2 + \xi_{yz}^2 + \xi_{zx}^2)}. \quad (24)$$

Используя метод Ритца, принципиально можно решить системы (6) или (7) с ограничением (8) с любой степенью точности. В практических расчетах такая возможность фактически отсутствует, так как неизвестен аналитический метод решения системы нелинейных алгебраических уравнений.

При использовании метода Ритца неизвестные коэффициенты A_i , B_i , C_i в системе (12) определяют как корни системы уравнений

$$\partial N / \partial A_i = 0; \quad \partial N / \partial B_i = 0; \quad \partial N / \partial C_i = 0. \quad (25)$$

Однако, как правило, интегралы функции N не вычисляются в квадратурах, а сами уравнения системы настолько сложны, что их невозможно разрешить относительно коэффициентов A_i , B_i , C_i .

Для преодоления этих затруднений применяют численные методы решения, из которых наиболее эффективными, как показал опыт, являются метод поиска на сетке варьируемых параметров и градиентный метод или некоторые разновидности последнего.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОКАТКЕ П-ОБРАЗНЫХ ПРОФИЛЕЙ

При выборе кинематически возможного поля скоростей используем модель жесткопластической среды и гипотезу плоских сечений. При этом также предполагаем, что деформация происходит только в геометрическом очаге деформации.

Очаг деформации делим (рис. 14, a) на три характерных участка [14]: деформируемый горизонтальными приводными валками активный участок 1, переходный участок 2 и деформируемый между вертикальной поверхностью горизонтальных валков и вертикальными холостыми валками участок 3. Ввиду симметрии относительно продольно-вертикальной плоскости рассматриваем $\frac{1}{2}$ очага деформации.

Для задаваемого исходного сечения не учитываем деформацию на наружной поверхности в месте стыка стенки и полок профиля. Такая форма исходного сечения (рис. 14, a) предот-

вращает переполнение калибра в процессе прокатки и соответствует реальному процессу в промышленных условиях.

Так как вертикальные валки являются неприводными, то их диаметр значительно меньше, чем горизонтальных. Кроме того, основное обжатие осуществляется горизонтальными приводными валками. Поэтому при задаче полосы вначале про-

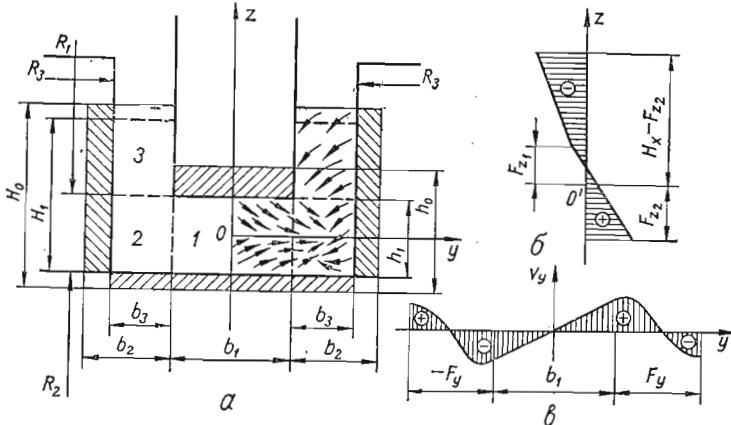


Рис. 14. Поперечные сечения очага деформации (а) и схемы скоростей перемещений v_z (б) и v_y (в) при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах.

исходит захват горизонтальными приводными валками. В результате на начальной стадии захвата происходит уширение стенки, которое при захвате вертикальными валками приводит к переполнению калибра (образованию так называемых лампасов). По мере прохождения полосы через очаг деформации лампасы деформируются между горизонтальными и вертикальными валками и получают значительное вынужденное уширение. Вполне естественно, что для устранения этого дефекта на исходной задаваемой полосе необходимо предусматривать закругление наружных углов.

Так как П-образный профиль не имеет продольно-горизон-

тальной плоскости симметрии, то в очаге деформации абсолютные обжатия со стороны нижней и верхней поверхностей стенки неодинаковы. Если предположить, что распределение абсолютных обжатий стенки соответствует одинаковым контактным поверхностям (их проекциям на горизонтальную плоскость), то

$$b_1 \sqrt{R_1 \Delta h_1} = (b_1 + 2b_3) \sqrt{R_2 (h_0 - h_1 - \Delta h_1)}, \quad (26)$$

где Δh_1 — абсолютное обжатие со стороны верхнего горизонтального валка, или после несложных преобразований

$$\Delta h_1 = (h_0 - h_1) \left[\frac{b_1^2 R_1}{(b_1 + 2b_3)^2 R_2} + 1 \right]^{-1}. \quad (27)$$

Если теперь определить длину очага деформации со стороны верхнего горизонтального, нижнего горизонтального и вертикального валков, то наибольшей будет длина очага деформации со стороны верхнего горизонтального валка:

$$l = \sqrt{R_1 \Delta h_1}. \quad (28)$$

Поэтому при определении общей протяженности геометрического очага деформации в продольном направлении используем, как и для двутаврового профиля, прием выравнивания длин, принимая в качестве длины очага деформации максимальную длину l при фактических абсолютных обжатиях со стороны горизонтальных и вертикальных валков.

Уравнение поверхности верхнего горизонтального валка, разрешенное относительно аппликаты, запишется в виде

$$F_{z1} = R_1 + 0,5\Delta h_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}. \quad (29)$$

Поверхность нижнего горизонтального валка при абсолютном обжатии $h_0 - h_1 - \Delta h_1$ представим как поверхность параболического цилиндра

$$F_{z2} = -0,5h_1 - (h_0 - h_1 - \Delta h_1) x^2/l^2. \quad (30)$$

Также в виде уравнения параболического цилиндра записывается и разрешенное относительно ординаты уравнение

поверхности вертикального валка:

$$F_y = 0,5b_1 + b_3 + (b_2 - b_3)x^2/l^2. \quad (31)$$

Кроме того, уравнение поверхности вертикального валка может быть представлено уравнением кругового цилиндра F_y при длине очага деформации l и абсолютном обжатии $b_2 - b_3$:

$$F_y = R + b_2 - b_3 - \sqrt{R^2 - x^2}, \quad (32)$$

где

$$R = 0,5 [l^2/(b_2 - b_3) + (b_2 - b_3)]. \quad (33)$$

Функции (31) и (32) незначительно отличаются друг от друга как по величине, так и по значениям производных. Выражение (31) несколько проще по своей структуре. В то же время использование функции (32) позволяет ввести в случае необходимости угловую скорость вращения вертикальных валков.

После определения геометрии очага деформации необходимо выбрать кинематически возможное поле скоростей перемещений.

Скорости продольного перемещения v_x и относительного удлинения, которые одинаковы для всех участков, записываются в виде [33]

$$v_x = -a_1 v_{B_1} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^3}{l^3} \right]; \quad (34)$$

$$\xi_x = \frac{\partial v_x}{\partial x} = 3a_1 v_{B_1} \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^2}{l^3}. \quad (35)$$

Варьируемыми параметрами, подлежащими определению при решении вариационной задачи, являются коэффициент опережения a_1 и коэффициент вытяжки λ или коэффициент утяжки $\delta = H_1/H_0$, который связан с коэффициентом вытяжки λ условием постоянства объема и определяется по формуле

$$\delta = 2b_2 H_1 [b_1 \lambda - b_1 h_0 + 2(b_2 - b_3)(h_0 - h_1 - \Delta h_1) + 2b_3 \lambda H_1]^{-1}, \quad (36)$$

если расчет формоизменения ведется против хода прокатки.

На участке 1 (рис. 14, а) вертикальная компонента скорости v_{z_1} запишется на основании выражения (18) в следующем виде:

$$v_{z_1} = v_{z_{1K_1}} - \frac{(v_{z_{1K_1}} - v_{z_{1K_2}})}{(F_{z_2} - F_{z_1})} (z - F_{z_1}). \quad (37)$$

Из уравнения (37) находим

$$\xi_{z_1} = \frac{\partial v_{z_1}}{\partial z} = -\frac{v_{z_{1K_1}} - v_{z_{1K_2}}}{F_{z_2} - F_{z_1}}. \quad (38)$$

С учетом уравнения (38) выражение (37) можно представить в виде

$$v_{z_1} = v_{z_{1K_1}} + \xi_{z_1} (z - F_{z_1}). \quad (39)$$

Скорости на контактных поверхностях $v_{z_{1K_1}}$ и $v_{z_{1K_2}}$ определяются из условия непроницаемости (10) для поверхностей F_{z_1} и F_{z_2} при $\frac{\partial F_{z_1}}{\partial y} = 0$ и $\frac{\partial F_{z_2}}{\partial y} = 0$:

$$v_{z_{1K_1}} = v_x \frac{\partial F_{z_1}}{\partial x}; \quad v_{z_{1K_2}} = v_x \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x}. \quad (40)$$

При этом из уравнений (29) и (30) находим

$$\frac{\partial F_{z_1}}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}; \quad \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x} = -2(h_0 - h_1 - \Delta h_1) \frac{x}{l^2}. \quad (41)$$

Компонента v_y , записывается как

$$v_{y_1} = -(\xi_x + \xi_{z_1}) y. \quad (42)$$

Далее переходим к выбору кинематически возможного поля скоростей на переходном участке 2. Скорость v_{y_2} аппроксимируем полиномом второго порядка

$$v_{y_2} = B_0 + B_1 y + B_2 y^2, \quad (43)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= 0,25 B_2 b_1^2; \quad B_1 = \xi_{y_1} - B_2 b_1; \\ B_2 &= (v_{y_{2K}} - \xi_{y_1} F_y) (0,25 b_1^2 + F_y b_1 + F_y^2)^{-1}, \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

при этом

$$v_{y_{2k}} = v_x \frac{\partial F_y}{\partial x}, \quad (45)$$

а $\frac{\partial v_y}{\partial x}$ определяется из формулы (31):

$$\partial F_y / \partial x = 2(b_2 - b_3)x/l^2. \quad (46)$$

Из уравнения (43) имеем

$$\xi_{y_2} = \partial v_{y_2} / \partial y = B_1 + 2B_2 y. \quad (47)$$

Скорость v_{z_2} определяем из условия несжимаемости на участке 2

$$\xi_{z_2} = -(\xi_x + \xi_{y_2}). \quad (48)$$

Интегрируя выражение (48) и удовлетворяя граничному условию $v_{z_2} = v_{z_{1k_2}}$ при $z = F_{z_2}$, получаем

$$v_{z_2} = v_{z_{1k_2}} + \xi_{z_2}(z - F_{z_2}). \quad (49)$$

В дальнейшем при вычислении скоростей относительных сдвигов следует иметь в виду, что функции v_{z_2} и ξ_{z_2} зависят от y .

На участке 3 имеем

$$v_{y_3} = v_x \left(\frac{y - 0,5b_1}{F_y - 0,5b_1} \right) \frac{\partial F_y}{\partial x}; \quad (50)$$

$$\xi_{y_3} = \frac{\partial v_{y_3}}{\partial y} = v_x \frac{\partial F_y}{\partial x} \frac{1}{(F_y - 0,5b_1)}; \quad (51)$$

$$\xi_{z_3} = -(\xi_x + \xi_{y_3}). \quad (52)$$

При граничном условии

$$v_{z_3} = v_{z_2} \quad (53)$$

и $z = F_{z_1}$ находим v_{z_3} после интегрирования формулы (52):

$$v_{z_3} = v_{z_2} |_{z=F_{z_1}} + \xi_{z_3}(z - F_{z_1}), \quad (54)$$

где в соответствии с выражениями (37) и (38)

$$v_{z_2} |_{z=F_{z_1}} = v_{z_{1k_2}} + \xi_{z_2}(F_{z_2} - F_{z_1}). \quad (55)$$

Компоненты скоростей относительных сдвигов определены из формулы (4).

В качестве параметров процесса приняты следующие величины:

$$\begin{aligned} m_1 &= b_1/R_1; \quad m_2 = b_2/R_3; \quad m_3 = h_0/R_1; \\ m_4 &= h_0/h_1; \quad m_5 = b_2/b_3; \quad m_6 = H_0/R_3. \end{aligned} \quad (56)$$

Решение вариационного уравнения (7) с учетом ограничения (8) выполнено на ЭВМ ЕС-1022.

На основании теоретических исследований получена формула для определения коэффициента вытяжки

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,71 + 1,52m_2 - 0,70m_3 + 0,19m_4 - 0,15m_5 - 0,19m_6 - \\ &- 0,98m_2m_4 + 4,29m_3m_4 - 3,91m_3m_5 + 0,26m_4m_5 - \\ &- 0,56m_4m_6 - 0,77m_5m_6 \end{aligned}$$

со средней ошибкой 8,4 % для следующих пределов изменения m_i : $0,11 \leq m_1 \leq 0,35$; $0,11 \leq m_2 \leq 0,48$; $0,04 \leq m_3 \leq 0,09$; $1,3 \leq m_4 \leq 1,8$; $1,3 \leq m_5 \leq 1,8$; $0,32 \leq m_6 \leq 0,9$.

На рис. 15 приведена схема очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах. Выбор кинематически возможного поля скоростей выполнен аналогично П-образному профилю.

Решение вариационного уравнения для двутаврового профиля выполнено на ЭВМ ЕС-1022.

На основании теоретических исследований был проведен планируемый эксперимент по ортогональному центральному композиционному плану. В результате получены формулы для определения коэффициента вытяжки λ и коэффициента утяжки $\delta = H_1/H_0$:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,521 + 2,38m_1 - 1,54m_2 - 16,4m_3 + 0,51m_4 + 0,12m_5 + \\ &+ 1,48m_6 + 34,9m_1m_3 - 1,64m_1m_5 - 3,12m_1m_6 - 1,4m_2m_4 + \\ &+ 1,85m_2m_5 + 1,43m_2m_6 + 8,14m_3m_4 - 3,15m_3m_5 + \\ &+ 6,15m_3m_6 + 0,31m_4m_5 - 1,28m_4m_6 \end{aligned}$$

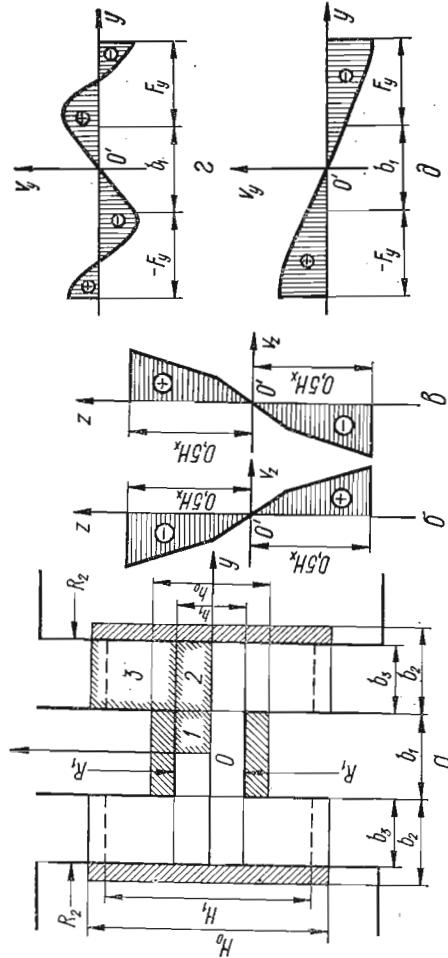


Рис. 15. Поперечные сечения очага деформации (a) и возможные схемы скорости скрещивания в четырехвалковом калибре.

при средней ошибке 12,5 %,

$$\begin{aligned} \delta = & -0,278 + 0,224m_1 + 0,168m_2 + 8,15m_3 + 0,214m_4 + \\ & + 0,168m_5 - 0,712m_6 + 0,710m_6^2 + 3,54m_1m_2 + 13,28m_1m_3 - \\ & - 0,718m_1m_5 + 2,15m_1m_6 - 12,85m_2m_3 + 1,05m_2m_4 - \\ & - 1,34m_2m_5 + 1,43m_2m_6 - 4,51m_3m_4 + 3,53m_3m_5 - 5,12m_3m_6 - \\ & - 0,31m_4m_5 + 0,35m_4m_6 - 0,61m_5m_6 \end{aligned}$$

при средней ошибке 10,2 % для следующих пределов изменения m_i : $0,057 \leq m_1 \leq 0,381$; $0,639 \leq m_2 \leq 2,361$; $0,029 \leq m_3 \leq 0,095$; $1,05 \leq m_4 \leq 1,999$; $1,05 \leq m_5 \leq 1,999$; $1,087 \leq m_6 \leq 3,605$, где

$$\left. \begin{array}{l} m_1 = b_1/R_1; \quad m_2 = b_3/h_1; \quad m_3 = h_0/R_1; \\ m_4 = h_0/h_1; \quad m_5 = b_2/b_3; \quad m_6 = H_0/h_0. \end{array} \right\} \quad (57)$$

ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ФЛАНЦЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Постановка общей задачи для четырехвалковых калибров с неприводными вертикальными валками с цилиндрической формой поверхностей горизонтальных и вертикальных валков позволяет рассмотреть в одном решении целый комплекс фланцевых профилей, выполнить решение вариационной задачи на ЭВМ и получить формулы для расчета формоизменения и энергосиловых параметров.

Обобщенная математическая модель позволяет охватить не только фланцевые профили (двулавры, П-образные, тавровые, зетовые и угловые) с одной или двумя осями симметрии, но также все эти профили сплошной асимметрии с различной высотой и шириной отдельных элементов. При этом асимметрия не вводится произвольно по нашему желанию, а является вынужденной, так как без нее невозможно объединить фланцевые профили с одной или двумя осями симметрии в единую задачу.

В качестве обобщенного профиля выбирается двутавровый асимметричный профиль (рис. 16), обязательность асимметрии которого определяется условиями перехода к остальным видам фланцевых профилей. Например, различная ширина стенки (гребней) со стороны нижнего и верхнего валков обуславливается возможностью перехода к П-образному калибру. При переходе же к тавровому калибру необходима различная высота левых полок по сравнению с правыми и так далее.

Следует заметить, что приведенное ниже решение может быть в случае необходимости выполнено за счет некоторого усложнения для случая поверхностей валков любой формы, при-

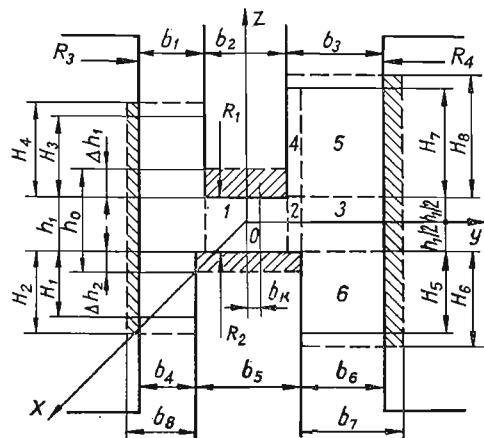


Рис. 16. Поперечные сечения очага деформации для обобщенной математической модели процесса прокатки фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах.

водных горизонтальных и вертикальных валков или же для случая использования четырехвалкового калибра как роликовой волоки, т. е. с неприводными горизонтальными и вертикальными валками.

При выборе кинематически возможного поля скоростей для двутаврового асимметричного профиля используется, как и обычно [33], модель жесткопластической несжимаемой среды и гипотеза плоских сечений. При этом нет необходимости выбирать поле скоростей для всего калибра. Вполне достаточно определить поле скоростей перемещений для стенки шириной b_2 и правых полок, а далее при составлении функционала в

процессе вычисления мощностей всех сопротивлений для левых полок использовать имеющиеся выражения для правых полок, подставляя в них соответствующие размеры и параметры левых полок. Такой алгоритм вычислений на ЭМВ особых трудностей не представляет и часто используется.

При распределении обжатий по стенке со стороны нижнего и верхнего горизонтальных валков полагаем, что абсолютные обжатия Δh_1 и $h_0 - h_1 = \Delta h_1$ таковы, что проекции площадей контакта со стороны верхнего и нижнего валков равны. Тогда при $R_1 \neq R_2$

$$b_2 \sqrt{R_1 \Delta h_1} = b_5 \sqrt{R_2 (h_0 - h_1 - \Delta h_1)}. \quad (58)$$

Из уравнения (58) имеем

$$\Delta h_1 = (h_0 - h_1) b_5^2 R_2 (b_5^2 R_2 + b_2^2 R_1)^{-1}. \quad (59)$$

Так как со стороны горизонтальных и вертикальных валков разные абсолютные обжатия и катающие радиусы, то различны и соответствующие длины геометрических очагов деформации отдельных участков. Максимальной длиной очага деформации будет длина очага со стороны верхнего валка. Эту длину обозначаем через l и принимаем общей для всего очага деформации:

$$l = \sqrt{R_1 \Delta h_1}. \quad (60)$$

Уравнение поверхности F_{z_1} верхнего горизонтального валка, разрешенное относительно z :

$$F_{z_1} = R_1 + 0,5h_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}. \quad (61)$$

Уравнение поверхностей нижнего горизонтального, правого и левого вертикальных валков (F_{z_2} , F_{y_4} и F_{y_3} соответственно) аппроксимируем уравнениями параболических цилиндров при общей длине очага деформации l (60):

$$F_{z_2} = -0,5h_1 - (h_0 - h_1 - \Delta h_1) x^2/l^2; \quad (62)$$

$$F_{y_4} = 0,5b_5 + b_6 + (b_7 - b_6) x^2/l^2; \quad (63)$$

$$F_{y_3} = -0,5b_5 - b_4 - (b_8 - b_4) x^2/l^2. \quad (64)$$

Возможен и другой подход к рассмотрению поверхностей горизонтальных и вертикальных валков. В этом случае обжатия по стенке распределяются с учетом разных радиусов валков R_1 и R_2 таким образом, чтобы длины очага деформации со стороны нижнего и верхнего горизонтальных валков были равны, т. е.

$$R_1 \Delta h_1 = R_2 \Delta h_2, \quad (65)$$

$$\text{где } \Delta h_2 = h_0 - h_1 - \Delta h_1.$$

Тогда из формулы (65) следует, что

$$\Delta h_1 = R_2 (h_0 - h_1) / (R_1 + R_2). \quad (66)$$

Поверхности правого F_{y_4} и левого F_{y_3} вертикальных валков могут быть представлены в виде поверхностей круговых цилиндров аналогично формуле (32) при общей длине очага деформации l .

Кроме того, при решении обобщенной задачи может быть введена асимметрия гребня нижнего вертикального валка относительно вертикальной оси Oz .

Выбираем кинематически возможное поле скоростей. Разделение очага деформации на отдельные участки приведено на рис. 15.

Скорость продольного перемещения v_x , которая одинакова для всех участков, записываем в виде полинома третьей степени (16)

$$v_x = -a_1 v_{y_1} \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) \frac{x^3}{l^3} \right]. \quad (67)$$

На участке 1, согласно выражениям (18) и (20),

$$v_{z_1} = v_{z_1 k_1} - \frac{(v_{z_1 k_1} - v_{z_1 k_2})}{(F_{z_2} - F_{z_1})} (z - F_{z_1}), \quad (68)$$

$$\xi_{z_1} = -\frac{v_{z_1 k_1} - v_{z_1 k_2}}{F_{z_2} - F_{z_1}}. \quad (69)$$

Из условия несжимаемости (3)

$$\xi_{y_1} = -(\xi_x + \xi_{z_1}). \quad (70)$$

После интегрирования уравнения (70) с учетом граничного условия $v_{y_1} = 0$ при $y = b_k$

$$\nu_{y_1} = \xi_{y_1} (y - b_k). \quad (71)$$

Скорости $v_{z_1 k_1}$ и $v_{z_1 k_2}$ на контактных поверхностях F_{z_1} и F_{z_2} определяются из условия непроницаемости (10), которое для контактных поверхностей F_{z_1} и F_{z_2} при $\partial F_{z_1} / \partial y = 0$ и $\partial F_{z_2} / \partial y = 0$ записываются в виде

$$v_{z_1 k_1} = v_x \frac{\partial F_{z_1}}{\partial x}, \quad v_{z_1 k_2} = v_x \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x}, \quad (72)$$

где

$$\frac{\partial F_{z_1}}{\partial x} = \frac{x}{\sqrt{R_1^2 - x^2}}, \quad \frac{\partial F_{z_2}}{\partial x} = -2(h_0 - h_1 - \Delta h_1) \frac{x}{l^2}. \quad (73)$$

Переходим к участку 2, ширина которого $0,5(b_5 - b_2)$ и высота $F_{z_1} - F_{z_2}$. Участок 2 образуется за счет разницы в ширине гребней нижнего и верхнего валков. К участку 2 примыкает участок 3. Скорость поперечного перемещения определяем одновременно для участков 2 и 3. Тогда, представляя $v_{y_2,3}$ в виде полинома

$$v_{y_2,3} = B_0 + B_1 y + B_2 y^2 \quad (74)$$

и удовлетворяя граничным условиям

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } y = 0,5b_2 \quad v_{y_2,3} = v_{y_1}; \quad \xi_{y_2,3} = \xi_{y_1}; \\ \text{при } y = F_{y_4} \quad v_{y_2,3} = v_{y_3 k}, \end{array} \right\} \quad (75)$$

имеем

$$\begin{aligned} B_0 &= 0,25 B_2 b_2^2; \quad B_1 = \xi_{y_1} - B_2 b_2; \\ B_2 &= (v_{y_3 k} - \xi_{y_1} F_{y_4}) (0,25 b_2^2 - F_{y_4} b_2 + F_{y_4}^2)^{-1}, \end{aligned} \quad (76)$$

где $v_{y_3 k}$ определяется из условия непроницаемости (11) при $\frac{\partial F_{y_4}}{\partial z} = 0$.

$$v_{y_3 k} = v_x \frac{\partial F_{y_4}}{\partial x}, \quad (77)$$

а $\partial F_{y_4}/\partial x$ определяется из выражения (63):

$$\frac{\partial F_{y_4}}{\partial x} = 2(b_7 - b_6) \frac{x}{l^2}. \quad (78)$$

Из уравнения (74) находим $\xi_{y_{2,3}}$:

$$\xi_{y_{2,3}} = \partial v_{y_{2,3}}/\partial y = B_1 + 2B_2 y. \quad (79)$$

Тогда из условия несжимаемости

$$\xi_{z_{2,3}} = -(\xi_x + \xi_{y_{2,3}}). \quad (80)$$

Удовлетворяя граничному условию при $z = F_{z_2}$,

$$v_{z_2} = v_{z_1 k_2}, \quad (81)$$

получим на участке 2 после интегрирования уравнения (80)

$$v_{z_2} = v_{z_1 k_2} + \xi_{z_{2,3}}(z - F_{z_2}). \quad (82)$$

Для определения v_z , на участке 3 вначале находим нейтральную поверхность на участке 2, для которой $v_{z_2} = 0$ при $y = 0,5b_2$. Тогда, обозначая z через h_h , имеем из уравнения (82)

$$h_h = F_{z_2} - v_{z_1 k_2}/\xi_{z_{2,3}}^*, \quad (83)$$

где $\xi_{z_{2,3}}^* = \xi_{z_{2,3}}|_{y=0,5b_2}$.

Интегрируя формулу (80) и удовлетворяя граничному условию $v_{z_3} = 0$ при $z = h_h$, находим

$$v_{z_3} = \xi_{z_{2,3}}(z - h_h). \quad (84)$$

Таким образом, на участках 2 и 3 полностью определено поле скоростей. Далее переходим к участкам 4 и 5, для которых скорость поперечного перемещения является общей и задается в виде

$$v_{y_{4,5}} = B_0 + B_1 y. \quad (85)$$

Удовлетворяя граничным условиям

$$v_{y_{4,5}} = 0 \text{ при } y = 0,5b_2; \quad v_{y_{4,5}} = v_{y_{4,5}k} \text{ при } y = F_{y_4}, \quad (86)$$

имеем из выражения (85)

$$v_{y_{4,5}} = v_x \frac{(y - 0,5b_2)}{(F_{y_4} - 0,5b_2)} \frac{\partial F_y}{\partial x}, \quad (87)$$

где вместо $v_{y_{4,5}k} = v_{y_3k}$ подставлено его значение из уравнения (77).

Значение $\xi_{y_{4,5}}$ находим из формулы (87)

$$\xi_{y_{4,5}} = \frac{\partial v_{y_{4,5}}}{\partial y} = \frac{v_x}{(F_{y_4} - 0,5b_2)} \frac{\partial F_{y_4}}{\partial x}. \quad (88)$$

Из условия несжимаемости

$$\xi_{z_{4,5}} = -(\xi_x + \xi_{y_{4,5}}). \quad (89)$$

Далее, удовлетворяя граничным условиям

$$\text{при } z = F_{z_1}, \quad v_{z_4} = v_{z_1}; \quad \text{при } z = F_{z_1}, \quad v_{z_5} = v_{z_3}, \quad (90)$$

находим после интегрирования уравнения (90) соответственно v_{z_4} и v_{z_5} :

$$v_{z_4} = v_{z_1}|_{z=F_{z_1}} + \xi_{z_{4,5}}(z - F_{z_1}), \quad (91)$$

$$v_{z_5} = v_{z_3}|_{z=F_{z_1}} + \xi_{z_{4,5}}(z - F_{z_1}). \quad (92)$$

Переходим к определению компонент поля скоростей v_{y_6} и v_{z_6} на участке 6. Задавая v_{y_6} в виде линейной функции от y

$$v_{y_6} = B_0 + B_1 y \quad (93)$$

и удовлетворяя граничным условиям

$$v_{y_6} = 0 \text{ при } y = 0,5b_5 \text{ и } v_{y_6} = v_{y_6k} \text{ при } y = F_{y_4}, \quad (94)$$

имеем из уравнения (93) с учетом того, что $v_{y_{4,5}k} = v_{y_6k}$,

$$v_{y_6} = v_x \frac{(y - 0,5b_5)}{(F_{y_4} - 0,5b_5)} \frac{\partial F_{y_4}}{\partial x}; \quad (95)$$

$$\xi_{y_6} = \frac{\partial v_{y_6}}{\partial y} = \frac{v_x}{(F_{y_4} - 0,5b_5)} \frac{\partial F_{y_4}}{\partial x}. \quad (96)$$

Из условия несжимаемости

$$\xi_{z_0} = -(\xi_x + \xi_{y_0}). \quad (97)$$

Интегрируя выражение (97) при граничном условии при $z = F_{z_0}$

$$v_{z_0} = v_{z_0}, \quad (98)$$

получаем

$$v_{z_0} = v_{z_0|z=F_{z_0}} + \xi_{z_0} (z - F_{z_0}). \quad (99)$$

Полученное кинематически возможное поле скоростей перемещений позволяет решить вариационную задачу для обобщенной математической модели процесса прокатки (или волочения) фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ В ФОРМИРУЮЩИХ И ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования процесса прокатки в формирующих и четырехвалковых калибрах были проведены на полупромышленном двухклетевом стане 300 Днепродзержинского индустриального института. Длина бочки валков стана 300—500 мм. Валки бандажированные, с диаметром оси 200 мм. Угловая частота вращения валков 32 об/мин (76,85 рад/с), скорость прокатки 0,5 м/с. Привод стана — от электродвигателя мощностью 125 кВт через редуктор (с передаточным числом 23,34) и шестеренную клеть. Материал прокатываемых образцов — сталь марки МСт3кп. Температура прокатки 1100—1150 °C. Образцы нагревались в электрической камерной печи. Время нагрева 15—20 мин. Для образования четырехвалковых калибров использовали кассеты с неприводными вертикальными валками конструкции Днепродзержинского индустриального института.

В тех случаях, когда замерялись энергосиловые параметры, усилие при прокатке определялось месдозами цилиндрического типа с тремя опорами, работающими на сжатие и изготовленными из стали марки ШХ15. Месдозы тарировались на гидравлическом прессе до и после замеров. Результаты тарировки подтвердили стабильность работы месдоз. Момент прокатки измерялся с помощью кольцевых токосъемных устройств со скользящими контактами. Тензодатчики типа 2ПКП-30. Выходные сигналы тензометрического четырехканального усилителя УТ-4-1 записывались на самопроявляющуюся фотобумагу УФС-100 двенадцатиканального осциллографа Н-117. Градуировка и осциллографирование исследуемых величин проводились методами, рекомендуемыми в работе [35].

Во всех исследованиях использовалась теория планируемого эксперимента [22].

ПРОКАТКА В ФОРМИРУЮЩИХ ДВУХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

При прокатке фасонных профилей с использованием четырехвалковых калибров большое значение имеет определение формоизменения в первых по ходу прокатки двухвалковых фасонных калибрах, в которых осуществляется первоначальное формирование профиля из заготовки квадратного, прямоугольного или круглого сечения. От точности оценок и расчетов коэффициентов уширения β (или вытяжки λ) и утяжки δ необжимаемых частей профиля зависит число двухвалковых и четырехвалковых калибров и эффективность калибровки.

При проведении на стане 300 экспериментальных исследований формоизменения металла при прокатке полос прямоугольного сечения в крестообразных калибрах в качестве независимых переменных были приняты [36] геометрические размеры очага деформации и калибра (рис. 17): h_0 и h_1 — толщина полосы до и после пропуска; b_0 — ширина полосы до пропуска; b_p — ширина вреза калибра; b_2 — размер, определяющий асимметричность положения полосы в калибре; R — радиус валков.

Длина образцов 300—350 мм. Исходя из технической характеристики стана 300, на размеры образцов и величину абсолютного обжатия наложены ограничения:

$$h_0 \leq 40 \text{ мм}; \quad b_0 \leq 80 \text{ мм}; \quad \Delta h \leq 20 \text{ мм}. \quad (100)$$

Интервалы изменений ширины вреза b_p и асимметричности b_2/b_0 выбраны на основании анализа действующих калибровок:

$$0,25b_2 \leq b_p \leq 0,4b_2; \quad 0,25 \leq b_2/b_0 \leq 0,5. \quad (101)$$

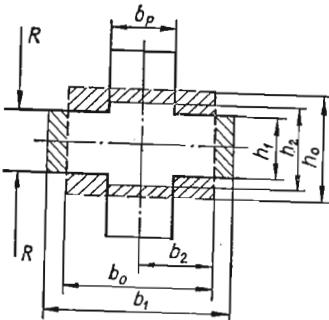


Рис. 17. Поперечный разрез очага деформации при прокатке полосы прямоугольного сечения в крестообразном калибре.

$$\begin{aligned} 1,3 &\leq m_1 \leq 2,0; \quad 3,0 \leq m_2 \leq 4,0; \quad 0,7 \leq m_3 \leq 1,6; \\ 1,0 &\leq m_4 \leq 1,5; \quad 7,5 \leq m_5 \leq 10,0. \end{aligned} \quad (102)$$

При планировании эксперимента в качестве моделей для неизвестных функций $\beta = b_1/b_0$ и $\delta = h_0/h_2$ берем полином второй степени. В качестве плана эксперимента использован точный насыщенный план B_5 , точками которого являются вершины гиперкуба и центры его граней [22]. Переменные x_i и m_i связаны зависимостями

$$\begin{aligned} x_1 &= 2,857m_1 - 4,714; \quad x_2 = 2m_2 - 7; \quad x_3 = 2,222m_3 - 2,556; \\ x_4 &= 4m_4 - 5; \quad x_5 = 0,8m_5 - 7, \end{aligned} \quad (104)$$

которые получены при переходе от переменных (103) к переменным x_i на основании соотношения

$$x_i = 2 \frac{m_i - m_{i,\text{ср}}}{m_{i,\text{макс}} - m_{i,\text{мин}}}. \quad (105)$$

Определение геометрических размеров образцов h_0 , b_0 , h_1 , b_p , b_2 проведено с использованием матрицы плана и формул (102), (103) и (104). Результаты экспериментов обработаны по методике, изложенной в работе [22]. Для полученных моделей выполнена проверка значимости коэффициентов a_i при уровне значимости $\alpha = 0,01$. После отбрасывания незначащих членов полиномов, перехода от переменных x_i к m_i , согласно зависимостям (104), и подстановки значений m_i получены из выражений (102) окончательные формулы для определения коэффициентов деформации β и δ :

$$\begin{aligned} \beta &= 0,478 + 0,464m_1 + 0,045m_2 + 0,015m_3 + 0,013m_5 - \\ &\quad - 0,062m_1m_2; \end{aligned} \quad (106)$$

$$\delta = 0,496 + 0,323m_1 + 0,036m_2 + 0,179m_3 - 0,167m_1m_3, \quad (107)$$

которые определены в интервалах изменения параметров m_i , указанных в системе неравенств (103).

Оценки дисперсии ошибок приближения в формулах (106) и (107) составляют соответственно 0,0074 и 0,0035.

Анализ формул (106) и (107) показывает, что на коэффициенты уширения и утяжки не оказывает значительного влияния величина размера b_2 , определяющего асимметричность положения полосы в калибре (естественно, в пределах изменения фактора $m_4 = b_2/h_1$).

Для определения коэффициента вытяжки λ в зависимости от геометрических параметров очага деформации при

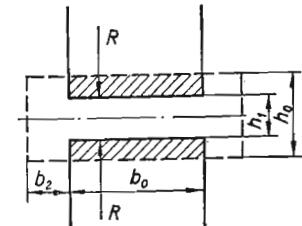


Рис. 18. Схема обжатия прямоугольной заготовки.

прокатке профилей двутавровой формы из прямоугольной заготовки (рис. 18) был спланирован и проведен [9] эксперимент на стане 300. Использовался ортогональный центральный композиционный план второго порядка [22]. При построении модели принимались во внимание взаимодействия факторов.

В качестве аргументов были приняты следующие относительные величины (рис. 18):

$$m_1 = h_0/h_1; m_2 = b_0/b_1; m_3 = b_2/b_1; m_4 = R/h_1 \quad (108)$$

с пределами изменения

$$\left. \begin{array}{l} 1,3 \leq m_1 \leq 2,0; 1,0 \leq m_2 \leq 3,5; \\ 0,5 \leq m_3 \leq 1,25; 7,5 \leq m_4 \leq 9,38. \end{array} \right\} \quad (109)$$

На основе формул для расчета оценок регрессионных коэффициентов получена зависимость для определения коэффициента вытяжки

$$\begin{aligned} \lambda = & 3,069 - 1,289m_1 - 2,689m_2 - 1,041m_3 - 0,349m_4 + \\ & + 2,019m_1m_2 + 0,998m_1m_3 + 0,246m_1m_4 + 1,928m_2m_3 + \\ & + 0,345m_2m_4 + 0,202m_3m_4 - 0,163m_1^2 - 0,114m_3^2 - \\ & - 1,447m_1m_2m_3 - 0,25m_1m_2m_4 - 0,156m_1m_3m_4 - \\ & - 0,256m_2m_3m_4 + 0,188m_1m_2m_3m_4. \end{aligned} \quad (110)$$

Проверка адекватности зависимости (110) производилась по критерию Фишера. Расчетное значение критерия Фишера равно 2,14, а табличное — 3,22 (при уровне значимости 0,01). Так как расчетное значение критерия Фишера меньше табличного, то модель является адекватной. Таким образом, формула (110) соответствует действительным зависимостям, имеющим место в условиях эксперимента, и может быть рекомендована для расчетов формоизменения при прокатке в разрезных калибрах со свободными уширением

В сортаменте проката фасонных профилей можно выделить несколько групп профилей тавровой формы. Часть из них

прокатывается за малое количество проходов из заготовки круглого сечения. При этом для формирования профиля часто используются тавровые калибры балочного типа.

Для определения формоизменения в тавровых калибрах балочного типа (рис. 19) был спланирован факторный эксперимент 2³ для линейных моделей функций отклика.

Область изменения размеров исходных заготовок и калибра была выбрана в соответствии с размерами профилей, прокатываемых в промышленных условиях:

$$20 \text{ мм} \leq d \leq 65 \text{ мм}; 10 \text{ мм} \leq b_1 \leq \\ \leq 35 \text{ мм}; 12 \text{ мм} \leq h_1 \leq 25 \text{ мм}. \quad (111)$$

Так как поставленная задача сводилась к моделированию процесса прокатки по геометрическим параметрам, то вначале был сделан переход к безразмерным факторам, выполняющим роль критериев подобия:

$$m_1 = d/h_1; m_2 = b_1/h_1; m_3 = D_{cp}/h_1, \quad (112)$$

где D_{cp} — средний диаметр валков.

В качестве основных коэффициентов деформации выбраны $\delta = H_1/d$ — коэффициент заполнения полок; $\beta = B_1/d$ — коэффициент уширения стенки.

Планируемый эксперимент был проведен на полупромышленном стане 300. Уклон внутренних граней полок принял равным 11°.

Расчетные значения критерия Кохрена для трех серий опытов с одной степенью свободы получились: для разброса значений $\delta - G_p = 0,57$, для разброса значений $\beta - G_p = 0,91$. Соответствующее табличное значение критерия Кохрена 0,97 при доверительной вероятности 0,95 позволило отбросить незначимые слагаемые. В окончательном виде формулы

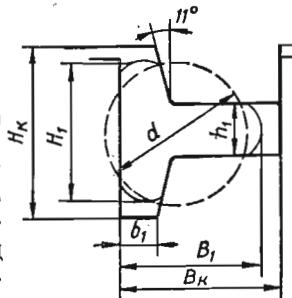


Рис. 19. Схема обжатия круглой заготовки в тавровом калибре балочного типа.

для определения δ и β имеют вид:

$$\delta = 3,335 - 1,415m_1 - 1,797m_2 - 0,107m_3 + 1,078m_1m_2 + 0,052m_1m_3 + 0,090m_2m_3 - 0,044m_1m_2m_3; \quad (113)$$

$$\beta = 0,883 + 0,216m_1 - 0,175m_2. \quad (114)$$

Адекватность этих моделей проверена по критерию Фишера при 5 %-ном уровне значимости. Получившиеся расчетные

значения критерия Фишера (2,16 и 0,705) существенно меньше табличных (19,16 и 5,41). Таким образом, подтверждается гипотеза об адекватности модели.

Для тавровых профилей с низкой стенкой первоначальное формирование профиля целесообразно проводить в тавровом калибре ребрового типа.

Проведенный с учетом потребностей производства предварительный анализ показал, что:

1. Значения коэффициентов формоизменения зависят (рис. 20) от диаметра исходной заготовки d , высоты калибра H_1 , толщины полок h_1 , ширины вреза b_1 и среднего диаметра валков $D_{cp} = 0,5(D_1 + D_2)$.

2. Изменение геометрических размеров и параметров прокатки целесообразно принять в следующих пределах:

$$30 \text{ мм} \leq d \leq 70 \text{ мм}; 20 \text{ мм} \leq H_1 \leq 35 \text{ мм}; \\ 10 \text{ мм} \leq h_1 \leq 25 \text{ мм}; 30 \text{ мм} \leq b_1 \leq \\ \leq 55 \text{ мм}; D_{cp} = 280 \text{ мм}. \quad (115)$$

3. Так как в производственных условиях температура прокатки и условия трения практически одинаковы для различных профилей, то нет необходимости менять их в ходе эксп

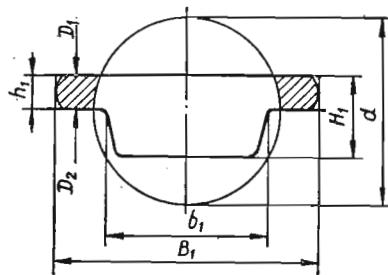


Рис. 20. Схема формоизменения круглой заготовки в тавровом калибре ребрового типа.

сперимента. Температура нагрева образцов составляла 1000—1100 °C.

4. Уклон боковых граней стенки может быть принят постоянным. В данном эксперименте этот уклон равен 10 %.

Эксперимент проводился по ортогональному центральному композиционному плану для четырех факторов:

$$m_1 = d/H_1; m_2 = h_1/H_1; m_3 = b_1/H_1; \\ m_4 = D_{cp}/H_1. \quad (116)$$

Основой плана является гиперкуб, т. е. следующая область изменения m_i :

$$1,617 \leq m_1 \leq 2,183; 0,451 \leq m_2 \leq 0,699; \\ 1,444 \leq m_3 \leq 1,656; 8,865 \leq m_4 \leq 12,673 \quad (117)$$

полного факторного эксперимента 2^4 для линейных моделей. Поэтому вначале при определении расчетных формул для коэффициента уширения

$$\frac{\Delta B}{\Delta h} = \frac{B_1 - d}{d - H_1} \quad (118)$$

и коэффициента вытяжки λ была предпринята проверка адекватности линейных моделей.

В процессе обработки полученных данных были проверены воспроизводимость опытов по критерию Кохрена при 5 %-ном уровне значимости, значимость коэффициентов по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 0,95 и адекватность моделей по критерию Фишера при 5 %-ном уровне значимости. В результате получено, что дисперсии однородны и линейные модели адекватны. Расчетные формулы после отбрасывания незначимых членов имеют вид

$$\Delta B/\Delta h = 0,159 + 1,174m_1 - 0,514m_2 - 1,245m_3 + \\ + 0,019m_4 - 1,368m_1m_2 + 1,849m_2m_3; \quad (119)$$

$$\lambda = 0,676 + 0,716m_1 - 0,362m_2 - \\ - 0,166m_3 - 0,009m_4. \quad (120)$$

Для оценки точности расчетных формул (119) и (120) были определены средние значения и средние квадратичные отклонения

s_1 и s_2 ошибок:

$$\Delta_1 = \frac{\lambda_{\text{расч}} - \lambda_{\text{эксп}}}{\lambda_{\text{эксп}} - 1}; \quad \Delta_2 = \frac{(\Delta B/\Delta h)_{\text{расч}} - (\Delta B/\Delta h)_{\text{эксп}}}{(\Delta B/\Delta h)_{\text{эксп}}}.$$

Получены следующие величины: $(\Delta_1)_{\text{ср}} = 0,0013$; $s_1 = 0,0492$; $(\Delta_2)_{\text{ср}} = 0,0022$; $s_2 = 0,0388$, и формулы (119) и (120) могут быть рекомендованы для практических расчетов при формировании таврового профиля с низкой стенкой из заготовки круглого сечения.

ПРОКАТКА ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Для определения коэффициентов вытяжки полосы λ и утяжки полок $\delta = H_1/H_0$ при прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах (рис. 21) был проведен планируемый эксперимент на полуупрощенном стане 300.

Изменение геометрических размеров и параметров прокатки принято в следующих пределах:

$$\begin{aligned} 5 \text{ мм} &\leq h_0 \leq 15 \text{ мм}; 2,5 \text{ мм} \leq \\ &\leq h_1 \leq 14 \text{ мм}; 17 \text{ мм} \leq H_0 \leq \\ &\leq 40 \text{ мм}; 15 \text{ мм} \leq b_1 \leq 40 \text{ мм}; \\ 5 \text{ мм} &\leq b_2 \leq 15 \text{ мм}; 2,5 \text{ мм} \leq \\ &\leq b_3 \leq 14 \text{ мм}; R_1 = 162 \text{ мм}; \\ R_2 &= 45 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (121)$$

Рис. 21. Схема формоизменения двутаврового профиля в четырехвалковом калибре.

Эксперимент проводился по ортогональному центральному композиционному плану с ядром 2^{6-1} для относительных аргументов (факторов):

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= b_1/R_1; \quad m_2 = b_2/R_2; \quad m_3 = h_0/R_2; \\ m_4 &= h_0/h_1; \quad m_5 = b_2/b_3; \quad m_6 = H_0/R_2 \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

с пределами их изменения по звездным точкам $0,09 \leq m_1 \leq 0,28$; $0,113 \leq m_2 \leq 0,337$; $0,029 \leq m_3 \leq 0,095$; $1,05 \leq m_4 \leq 2,0$; $1,05 \leq m_5 \leq 2,0$; $0,358 \leq m_6 \leq 0,892$ и основными уровнями варьирования $0,13 \leq m_1 \leq 0,24$; $0,16 \leq m_2 \leq 0,29$; $0,043 \leq m_3 \leq 0,081$; $1,25 \leq m_4 \leq 1,8$; $1,25 \leq m_5 \leq 1,8$; $0,47 \leq m_6 \leq 0,78$. Количество опытов равно 45. В качестве модели для искомых функций λ и δ был принят полином второй степени.

На основании формулы для расчета оценок коэффициентов полинома была составлена стандартная программа на ЭВМ ЕС-1022 при произвольном числе факторов для квадратичной и линейной моделей. При сравнении экспериментальных и расчетных данных получено, что для коэффициента вытяжки λ экспериментальные данные ближе совпадают с расчетными по линейной модели, а для коэффициента утяжки δ — по квадратичной модели.

Формулы для вычисления коэффициентов λ и δ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \lambda = & 0,442 + 2,52m_1 - 1,42m_2 - 18,95m_3 + 0,47m_4 + \\ & + 0,14m_5 + 1,56m_6 + 39,24m_1m_3 - 1,85m_1m_5 - \\ & - 3,05m_1m_6 - 1,4m_2m_4 + 1,73m_2m_5 + 1,49m_2m_6 + \\ & + 8,23m_3m_4 - 3,64m_3m_5 + 7,47m_3m_6 + \\ & + 0,36m_4m_5 - 1,34m_4m_6 \end{aligned} \quad (123)$$

при средней ошибке 4,2 %;

$$\begin{aligned} \delta = & -0,266 + 0,237m_1 + 0,166m_2 + 9,8m_3 + 0,288m_4 + \\ & + 1,168m_5 - 0,796m_6 + 0,708m_6^2 + 3,631m_1m_2 + \\ & + 14,369m_1m_3 - 0,793m_1m_5 + 2,226m_1m_6 - 14,526m_2m_3 + \\ & + 1,062m_2m_4 - 1,342m_2m_5 + 1,587m_2m_6 - 4,592m_3m_4 + \\ & + 3,636m_3m_5 - 5,768m_3m_6 - 0,305m_4m_6 + \\ & + 0,355m_4m_6 - 0,677m_5m_6 \end{aligned} \quad (124)$$

при средней ошибке 4,8 %.

ПРОКАТКА П-ОБРАЗНЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Для определения формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах (рис. 22) был проведен на полупромышленном стане 300 планируемый эксперимент.

В качестве независимых переменных были приняты геометрические размеры очага деформации и калибра, на которые, исходя из технической характеристики стана 300, наложены следующие ограничения:

$$\begin{aligned} 8 \text{ мм} &\leq h_0 \leq 13 \text{ мм}; \\ 4,4 \text{ мм} &\leq h_1 \leq 10 \text{ мм}; \\ 20,8 \text{ мм} &\leq b_1 \leq 38,4 \text{ мм}; \\ 7,2 \text{ мм} &\leq b_2 \leq 13,1 \text{ мм}; \\ 4,0 \text{ мм} &\leq b_3 \leq 10,5 \text{ мм}; \\ 21,2 &\leq H_0 \leq 35,1 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (125)$$

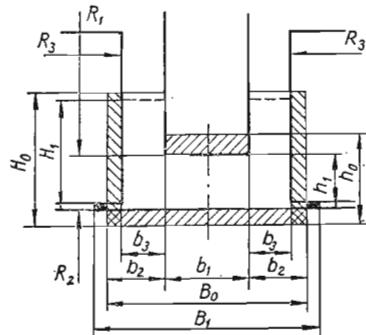


Рис. 22. Схема формоизменения П-образного профиля в четырехвалковом калибре.

нными в кассете вертикальными неприводными валками с радиусами $R_3 = 45$ мм.

Безразмерные относительные параметры m_i очага деформации приняты следующими:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= b_1/R_1; \quad m_2 = b_2/R_3; \quad m_3 = h_0/R_1; \\ m_4 &= h_0/h_1; \quad m_5 = b_2/b_3; \quad m_6 = H_0/R_3. \end{aligned} \right\} \quad (126)$$

Учитывая ограничения (125) и значения радиусов $R_1 = 160$ мм и $R_3 = 45$ мм, находим пределы изменения параметров m_i :

$$\left. \begin{aligned} 0,13 &\leq m_1 \leq 0,24; \quad 0,16 \leq m_2 \leq 0,29; \quad 0,05 \leq m_3 \leq 0,081; \\ 1,3 &\leq m_4 \leq 1,8; \quad 1,25 \leq m_5 \leq 1,8; \quad 0,47 \leq m_6 \leq 0,78. \end{aligned} \right\} \quad (127)$$

В качестве плана эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план с ядром 2^{6-1} , т. е. в качестве основы принят не весь план полного факторного эксперимента для линейной модели, а его полуреплика. Количество образцов $N = 2^{6-1} = 32$. Кроме того, было изготовлено еще 64 образца, которые использовались для настройки стана на заданные размеры.

При проведении планируемого эксперимента определялись коэффициенты вытяжки λ , утяжки $\delta = H_1/H_0$ и уширения стенки $\beta = B_1/B_0$, усилия прокатки со стороны горизонтальных P_g и вертикальных P_v валков и крутящий момент M_{kp} прокатки. Обработка результатов выполнена на ЭВМ ЕС-1022.

После отбрасывания незначащих членов полиномов получены окончательные формулы для определения коэффициентов формоизменения и энергосиловых параметров:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0,712 + 1,521m_2 - 0,704m_3 + 0,189m_4 - 0,151m_5 - \\ &- 0,192m_6 - 0,981m_2m_4 + 4,297m_3m_4 - 3,906m_3m_5 + \\ &+ 0,259m_4m_5 - 0,556m_4m_6 - 0,77m_5m_6, \end{aligned} \quad (128)$$

среднее относительное отклонение $\varepsilon = 2,0\%$;

$$\begin{aligned} \delta &= 0,274 + 0,659m_2 - 0,486m_3 + 0,192m_4 + 0,607m_5 + \\ &+ 0,211m_6 - 0,432m_2m_5 - 0,168m_4m_5 - 0,187m_5m_6, \end{aligned} \quad (129)$$

$\varepsilon = 0,9\%$;

$$\begin{aligned} \beta &= 0,588 - 0,124m_1 + 0,507m_2 + 0,599m_3 + 0,383m_4 + \\ &+ 0,081m_5 - 0,495m_2m_4 - 0,099m_4m_5, \end{aligned} \quad (130)$$

$\varepsilon = 1,1\%$.

Для приведения момента M_{kp} и усилия прокатки со стороны горизонтальных P_g и вертикальных P_v валков к безразмерному виду были определены площадь полосы до пропуска (рис. 22) $S_0 = b_1h_0 + 2b_2H_0$ и сопротивление деформации металла образцов σ_s , которое для стали МСт3 при температуре 1100 °C и средней скорости деформации 0,1 с^{-1} равно 57 Н/мм².

Безразмерные усилия \bar{P}_r , \bar{P}_b и момент прокатки \bar{M}_{kp} получены делением P_r , P_b и M_{kp} на $S_0\sigma_s$ и $S_0R_1\sigma_s$ соответственно:

$$\bar{P}_r = P_r/S_0\sigma_s; \quad \bar{P}_b = P_b/S_0\sigma_s; \quad \bar{M}_{kp} = M_{kp}/S_0R_1\sigma_s;$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_r = -2,34 - 39,7m_1 + 20,1m_2 + 3,3m_4 + 1,03m_5 - 2,01m_6 + \\ + 34,5m_1m_4 - 18,0m_2m_4, \end{aligned} \quad (131)$$

$\varepsilon = 9,9 \%$;

$$\begin{aligned} \bar{P}_b = -3,83 - 0,885m_1 + 8,5m_2 - 4,62m_3 + 0,405m_4 + \\ + 2,51m_5 + 2,2m_6 - 4,39m_2m_5 - 6,91m_2m_6, \end{aligned} \quad (132)$$

$\varepsilon = 10,4 \%$;

$$\begin{aligned} \bar{M}_{kp} = -0,256 - 2,71m_1 + 1,30m_2 + 0,207m_4 + 0,138m_5 + \\ + 2,27m_1m_4 - 1,22m_2m_4, \end{aligned} \quad (133)$$

$\varepsilon = 11,1 \%$.

ПРОКАТКА АСИММЕТРИЧНЫХ ДВУТАВРОВЫХ ПРОФИЛЕЙ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРАХ

Для определения коэффициентов формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке асимметричных двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах на полупромышленном стане 300 спланирован семифакторный эксперимент. В качестве независимых переменных приняты следующие относительные величины (рис. 23):

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= h_0/h_1; \quad m_2 = (h_0/h_1)(b_3/b_2); \quad m_3 = h_0/R_1; \\ m_4 &= b_1/R_1; \quad m_5 = b_2/R_2; \quad m_6 = H_1/R_2; \quad m_7 = H_2/H_4. \end{aligned} \right\} \quad (134)$$

В соответствии с конструктивными особенностями стана и кассет и с учетом условий захвата на геометрические размеры наложены ограничения:

$$\left. \begin{aligned} 5,9 \text{ мм} &\leqslant h_0 \leqslant 8,5 \text{ мм}; \quad 3,6 \text{ мм} \leqslant h_1 \leqslant 7,0 \text{ мм}; \\ 23,1 \text{ мм} &\leqslant H_1 \leqslant 40,7 \text{ мм}; \quad 6,6 \text{ мм} \leqslant b_2 \leqslant 11,4 \text{ мм}; \\ 23,3 \text{ мм} &\leqslant b_1 \leqslant 40,7 \text{ мм}; \quad 8,2 \text{ мм} \leqslant H_4 \leqslant 24,0 \text{ мм}; \\ 2,7 \text{ мм} &\leqslant H_2 \leqslant 12,9 \text{ мм}; \quad 4,2 \text{ мм} \leqslant b_3 \leqslant 10,8 \text{ мм}. \end{aligned} \right\} \quad (135)$$

Катающие радиусы валков приняты постоянными: $R_1 = 160$ мм и $R_2 = 45$ мм.

На основании ограничений (135) определены пределы изменения параметров m_i из системы (134): $1,221 \leqslant m_1 \leqslant 1,629$; $1,046 \leqslant m_2 \leqslant 1,154$; $0,0369 \leqslant m_3 \leqslant 0,0532$; $0,1457 \leqslant m_4 \leqslant 0,2543$; $0,1457 \leqslant m_5 \leqslant 0,2543$; $0,5142 \leqslant m_6 \leqslant 0,7858$; $0,2285 \leqslant m_7 \leqslant 0,7715$.

В качестве плана эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план с ядром 2^{7-2} и количеством опытов $N = 2^{7-2} = 32$. Проверка полученных формул по t -критерию Стьюдента показала, что часть коэффициентов является незначимыми и их можно исключить из уравнений. Тогда в окончательном виде получим следующие формулы:

$$\begin{aligned} \lambda = 1,815 + 0,667m_1 - 1,241m_2 + 2,09m_4 - 0,448m_5 - \\ - 0,9m_6 - 1,407m_7 - 1,467m_1m_4 + \\ + 0,631m_1m_6 + 1,279m_2m_7, \end{aligned} \quad (136)$$

$$\varepsilon = 2,5 \%$$

$$\begin{aligned} \delta_1 = \frac{H_5 + 0,5h_1}{H_4 + 0,5h_0} = 1,627 - 0,145m_1 - 0,335m_2 - 7,15m_3 - \\ - 0,244m_4 + 1,91m_5 - 1,05m_6 - 0,054m_7 + 2,64m_1m_3 + \\ + 0,457m_1m_4 - 1,36m_2m_5 + 0,801m_2m_6 + 3,68m_3m_6 - \\ - 2,03m_4m_5 + 1,99m_3m_7, \end{aligned} \quad (137)$$

$$\varepsilon = 1,0 \%$$

$$\begin{aligned} \delta_2 = \frac{H_3 + 0,5h_1}{H_2 + 0,5h_0} = 0,53 + 0,83m_1 - 0,43m_2 + 0,47m_5 + \\ + 0,88m_6 + 0,17m_7 - 0,74m_1m_6 - 0,26m_1m_7, \end{aligned} \quad (138)$$

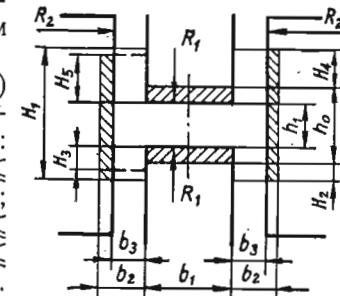


Рис. 23. Схема формоизменения асимметричного двутаврового профиля в четырехвалковом калибре.

$\varepsilon = 2,1 \%$;

$$\begin{aligned} \bar{P}_r = \frac{P_r}{S_0 \sigma_s} = & -30,94 + 21,97m_1 + 410,1m_3 + 65,56m_4 - \\ & - 34,32m_5 + 15,78m_6 - 225,5m_1m_3 - 12,75m_1m_6 - \\ & - 1457,0m_3m_4 + 762,7m_3m_5, \end{aligned} \quad (139)$$

$\varepsilon = 25,2 \%$;

$$\begin{aligned} \bar{P}_b = \frac{P_b}{S_0 \sigma_s} = & 13,78 - 3,11m_1 - 12,89m_2 - 46,94m_3 - \\ & - 15,65m_4 + 0,634m_7 + 4,884m_1m_2 + 16,39m_2m_4 - \\ & - 3,168m_4m_7, \end{aligned} \quad (140)$$

$\varepsilon = 37,4 \%$;

$$\begin{aligned} \bar{M}_{kp} = \frac{M_{kp}}{S_0 R_1 \sigma_s} = & 0,585 + 0,073m_1 - 0,2m_2 - 1,977m_4 - \\ & - 0,495m_5 - 0,21m_6 - 0,36m_7 + 1,67m_1m_4 + 0,253m_1m_7, \end{aligned} \quad (141)$$

$\varepsilon = 6,1 \%$.



МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ

ФАКТОРЫ ФОРМЫ КАЛИБРА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕЧЕНИЕ МЕТАЛЛА В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ

При прокатке фасонных профилей специального назначения четырехвалковые калибры целесообразно использовать, в первую очередь, в качестве чистовых или формирующих. В отдельных случаях для профилей особо сложной формы приходится увеличить число четырехвалковых калибров, чтобы получить профиль заданных размеров и формы.

Вследствие этого при расчете калибровки необходимо определять формоизменение не только в четырехвалковых, но и в двухвалковых калибрах. Но так как фасонные профили

специального назначения имеют самую разнообразную конфигурацию, необходимо иметь общие инженерные методы расчета формоизменения, которые позволяют с достаточной для практики точностью определять необходимые коэффициенты деформации. Таким методом является приведение реального калибра к соответственному.

Характеристику основных параметров калибра и очага деформации, влияющих на формоизменение металла при про-

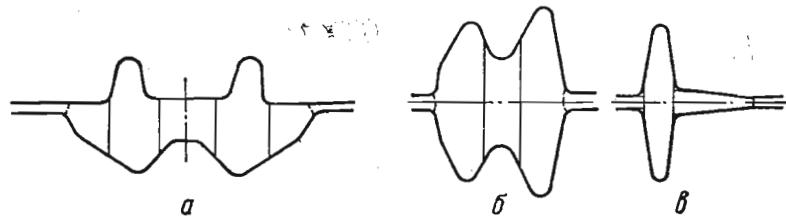


Рис. 24. Виды калибров для прокатки фасонных профилей:
а — профиль для подкладки к рельсам; б — профиль с продольными пазами;
в — тавровый профиль

катке фасонных профилей, целесообразно дать на примере калибров различного вида (рис. 24).

Общим признаком этих калибров является наличие высступов (гребней) и большой перепад высот по ширине калибра, что приводит к неравномерности деформации, характерной для профилей сложной формы. Можно считать, что основное влияние на формоизменение металла в фасонных калибрах оказывают следующие факторы: различие высот калибра по ширине; наклон стенок калибра; неравномерность обжатий по ширине.

При этом физико-механические и термодинамические параметры считаются постоянными величинами. В методах, применяемых в практике расчета калибровок, учитывается обычно влияние только некоторых из этих факторов. Так, например, метод соответственной полосы основан на использовании поправочных коэффициентов уширения для калибров с

вогнутым или выпуклым периметром при усреднении других характеристик. В методе приведенной полосы также используются коэффициенты стеснения или вынужденного уширения. Так или иначе моделирование процесса прокатки в фасонных калибрах прокаткой в гладких валах имеет тот недостаток, что возникает необходимость введения и определения поправочных и различных вспомогательных коэффициентов, причем эта задача тем труднее, чем сложней калибр. Естественно стремление избежать введения дополнительных коэффициентов или хотя бы уменьшить их количество и упростить определение их значений. Поэтому представляется целесообразным использовать в качестве модели для расчета формоизменения при прокатке фасонных профилей более подходящий калибр, который бы сохранил основные особенности, определяющие течение металла в исходном калибре. В этом смысле наиболее простую и приемлемую форму имеет калибр (профиль), состоящий из участков прямоугольной формы и называемый в дальнейшем соответственным.

Различие высот фасонного калибра по ширине и наклон стенок отображаются различием высот участков соответственного калибра. Усредняются и прямо моделируются неравномерность обжатия и необжимаемые участки фасонного профиля.

По этим характеристикам выделяются четыре типа соответственных калибров (рис. 25). При этом форма каждого соответственного калибра может быть изменена путем удаления одного или нескольких участков. Относительные обжатия на участках могут варьироваться по отношению друг к другу, причем некоторые участки могут быть и необжимаемыми. Например, прокатка в калибрах *а* и *б* (рис. 24) моделируется прокаткой в соответственном калибре (рис. 25, *а*), а прокатка в калибре *в* (рис. 24) — прокаткой в соответственном калибре (рис. 25, *б*).

Для реализации предложенного подхода необходимо решить две основные задачи: получить формулы или алгоритмы для расчета коэффициентов формоизменения в соответственных

калибрах и разработать способы приведения реального калибра к соответственному виду.

Прокатка в соответственном калибре достаточно полно моделирует реальное формоизменение металла в фасонных калибрах. Поэтому коэффициенты формоизменения, полученные данным методом, будут иметь более высокие точность и сте-

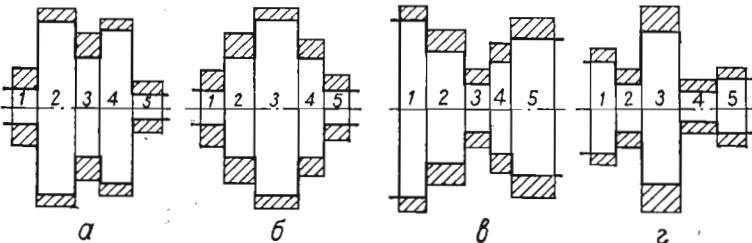


Рис. 25. Основные типы соответственных калибров (профилей).

пень достоверности, чем коэффициенты, рассчитанные с помощью соответственных, приведенных полос и других подобных методик.

С учетом того, что, кроме определения коэффициентов формоизменения, по ходу прокатки требуется их расчет и против хода прокатки, возможны два способа перехода к соответственному калибру, применение каждого из которых зависит от постановки задачи.

МЕТОДЫ ПРИВЕДЕНИЯ ФАСОННОГО КАЛИБРА К СООТВЕТСТВЕННОМУ

Рассмотрим методы приведения фасонного калибра к соответственному с использованием средних высот и приведения фасонного калибра к соответственному с использованием экстремальных высот.

Метод приведения с использованием средних высот рассмотрим на примере чернового калибра для прокатки профилей оконных переплетов (рис. 26). При этом размеры калибра (рис. 26, *а*) и расстояние между осями валков заданы и известны

размеры исходной полосы, а следовательно, и обжатия по ширине полосы. При переходе от реального калибра к соответственному делим реальный калибр вертикалями на участки, имеющие различные средние высоты. Построение соответственного калибра производится поэтапно следующим образом:

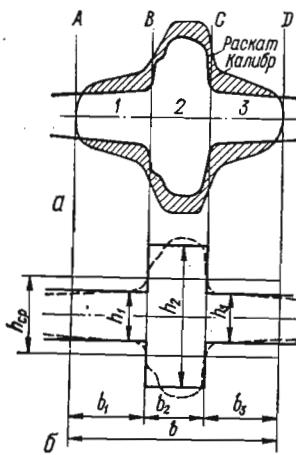


Рис. 26. Черновой калибр для прокатки профиля оконных переплетов (а) и соответственный калибр (б).

4. Определяем смещенные по высоте площади S_{h_1} , S_{h_2} и S_{h_3} на участках фасонного профиля. Считая, что эти площади равны смещенным площадям на участках соответственного калибра, рассчитываем высоты h_4 , h_5 и h_6 соответственного раската, т. е. находим обжатия.

В данном случае мы получили соответственный калибр, состоящий из трех участков, используя при этом условия равенства площадей участков исходного и соответственного калибров, равенства ширин участков и смещенных по высоте площадей.

Используя изложенный способ построения соответственно-

го калибра и задаваемого раската, можно рассчитать формоизменение реального калибра как по ходу, так и против хода прокатки при условии задания обжатия.

Способ приведения фасонного калибра к соответственному с использованием экстремальных высот в принципе незначительно отличается от первого способа. Однако второй способ обладает более широкими возможностями в тех случаях, когда профиль несколько асимметричен относительно горизонтальной оси, хотя может использоваться и для симметричных калибров. Условия геометрического и физического подобия соответственного и реально-го очагов деформации также соблюдаются в этом способе. Метод приведения рассмотрим на примере таврового профиля для оконных переплетов (рис. 27):

1. Ширина соответственного калибра равна ширине задаваемого (или выходящего) раската b . Калибр по ширине ограничиваем вертикалями ω_1 и ω_3 .

2. Определяем минимальные и максимальные высоты калибра h_1 , h_2 , h_3 и высоты на боковых границах калибра ω_1 и ω_3 , которые в данном случае совпадают с h_1 и h_3 .

3. Проводим вертикали ω там, где калибр имеет минимальные и максимальные высоты. Здесь h_1 и h_3 совпадают с ω_1 и ω_3 , а через h_2 проведена вертикаль ω_2 .

4. Делим калибр (рис. 27, а) вертикалью ω_2 на участки А и В и определяем площади этих участков S_A и S_B .

5. Строим соответственный калибр (рис. 27, б), полагая, что:

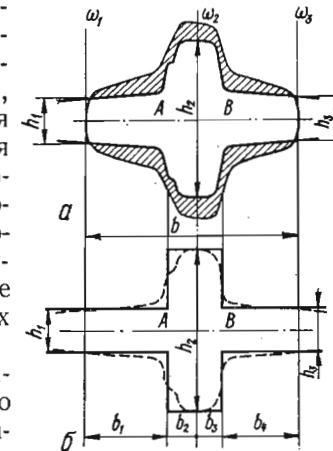


Рис. 27. Второй по ходу прокатки калибр для профиля оконных переплетов (а) и соответственный калибр (б).

ширины и площади участков A и B соответственного калибра равны ширинам и площадям участков A и B фасонного профиля;

участки A и B соответственного калибра имеют ступенчатый вид, причем высоты границ участков фасонного и соответственного калибров равны.

6. Учитывая условие равенства площадей участков, определяем неизвестные размеры b_1, b_2, b_3, b_4 соответственного калибра.

Поскольку $h_1 b_1 + h_2 b_2 = S_A, h_3 b_4 + h_2 b_3 = S_B$, а $b_1 + b_2 = b_A$ и $b_3 + b_4 = b_B$, где S_A, b_A — площадь и ширина участка A ; S_B, b_B — площадь и ширина участка B , то

$$b_1 = \frac{h_2 b_A - S_A}{h_2 - h_1};$$

$$b_4 = \frac{h_2 b_B - S_B}{h_2 - h_3};$$

$$b_2 = b_A - b_1; \quad b_3 = b_B - b_4.$$

Рис. 28. Соответственный калибр и раскат, полученные методом экстремальных высот.

$b_5 = b_2 + b_3$. Если нужно определить обжатия на участках 1, 2 и 3, то используем условие равенства смещенных по высоте площадей. Тогда

$$\Delta h_1 = h_4 - h_1 = S_{h_1}/b_1; \quad \Delta h_2 = h_5 - h_2 = S_{h_2}/b_5;$$

$$\Delta h_3 = h_6 - h_3 = S_{h_3}/b_4,$$

где $S_{h_1}, S_{h_2}, S_{h_3}$ — смещенные по высоте площади на соответствующих участках фасонного калибра (раската).

Рассмотрим пример более сложного калибра (рис. 29, a), предназначенного для прокатки профиля двухребордчатой подкладки для рельсов метрополитена. Этапы приведения калибра и основные критерии остаются теми же, что и для калибра на рис. 27, но так как калибр на рис. 29, a асимметричен, то

он приводится к соответственному калибуру, состоящему из пяти участков (см. рис. 25, a).

1. Так как в фасонном калибре (рис. 29, a) нужно определить свободное уширение, чтобы получить заданную ширину раската, то исключаем боковые стенки калибра и находим высоты h_1 и h_5 боковых участков калибра (рис. 29, b).

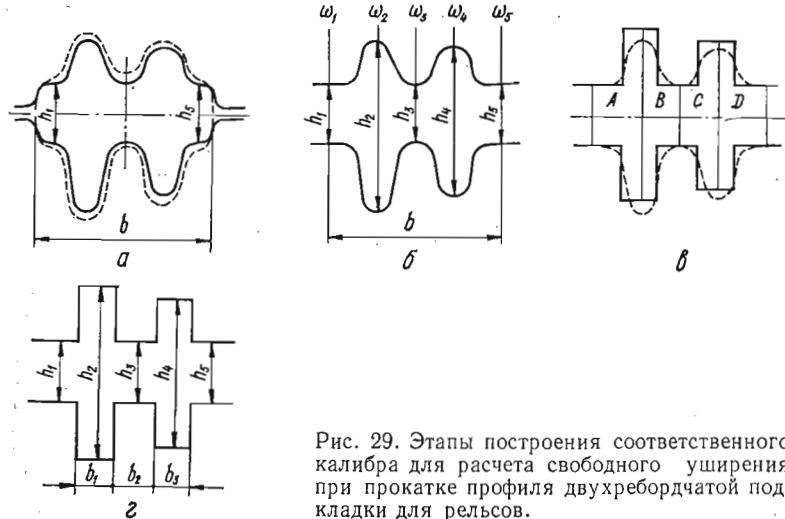
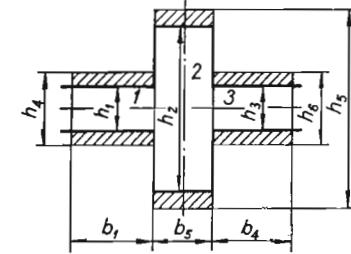


Рис. 29. Этапы построения соответственного калибра для расчета свободного уширения при прокатке профиля двухребордчатой подкладки для рельсов.

2. Ширину калибра берем равной ширине раската b . Определяем максимальные и минимальные высоты калибра h_2, h_3 и h_4 в местах сужения и расширения калибра, а также h_1 и h_5 — на его границах (рис. 29, b).

3. Проводя через точки экстремальных высот вертикали $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ и ω_5 , делим калибр на четыре участка A, B, C и D . Находим площади этих участков.

4. Заменяем участки фасонного калибра равновеликими по площади ступенчатыми участками соответственного калибра, симметричного относительно горизонтальной оси

(рис. 29, в). Сходственные высоты границ одних и тех же участков фасонного и соответственного калибров равны. Размеры b_1 , b_2 и b_3 определяются из условий равенства площадей участков.

В результате получаем соответственный калибр (рис. 29, г). Обжатия на участках определяются при необходимости из условия равенства смещенных по высоте площадей.

Рассмотрим далее достоинства и недостатки обоих методов, называя для краткости их «первый» и «второй» в той последовательности, в которой они были изложены.

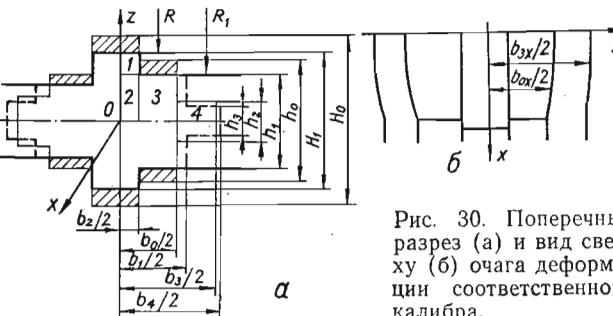
Первый способ подходит для приведения к соответственному виду только симметричных относительно горизонтальной оси или очень близких к симметричным фасонных калибров, тогда как второй — для симметричных и асимметричных калибров, т. е. второй способ имеет более широкую область приложения.

Первый способ позволяет даже сравнительно простой фасонный калибр привести к соответственному калибру, состоящему из пяти участков, если это необходимо для повышения точности расчетов коэффициентов формоизменения. Количество участков соответственного калибра, полученного вторым способом, однозначно определено формой фасонного калибра и не может быть ни увеличено, ни уменьшено. Это является недостатком второго способа, поскольку иногда препятствует увеличению точности расчетов формоизменения за счет увеличения количества участков. В целом оба способа не имеют существенных принципиальных различий и должны давать примерно одинаковую точность результатов. Первый способ целесообразно применять к более простым и симметричным относительно горизонтальной оси фасонным калибрам, второй — к асимметричным и более сложным калибрам.

РАСЧЕТ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ В СООТВЕТСТВЕННОМ КАЛИБРЕ С ПОМОЩЬЮ ВАРИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ

При определении коэффициентов формоизменения металла при прокатке необходимо для каждого из представленных на рис. 25 соответственных калибров решать отдельную вариа-

ционную задачу, поскольку используемые при решении упрощения и допущения зависят от вида профиля и калибра. В рассматриваемом случае выбор соответственных калибра и профиля для расчета формоизменения был обусловлен следующими соображениями: в очаге деформации должна наблюдаться ярко выраженная неравномерность обжатий по ширине; высота раската по ширине также должна быть неодинаковой;



выбрать для 1/4 очага деформации, а разную ширину и высоту участков по обе стороны критического сечения xOz учесть при вычислении мощностей. В соответствии с гипотезой плоских сечений принимаем [33]

$$v_x = -v_1 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{\lambda} \right) (10x^3/l^3 - 15x^4/l^4 + 6x^5/l^5) \right], \quad (142)$$

где v_1 — скорость полосы на выходе из валков при $x = 0$; $\lambda = v_1/v_0$ — коэффициент вытяжки; v_0 — скорость полосы на входе в валки при $x = l$; l — длина очага деформации на участке 1.

Уравнение поверхности F_{z_1} верхнего валка на участке 1

$$F_{z_1} = R + 0,5H_1 - \sqrt{R^2 - x^2}. \quad (143)$$

На участке 1 уширение полностью ограничено и, следовательно, $v_{y_1} = 0$ и $\xi_{y_1} = 0$. Тогда из условия несжимаемости (3)

$$-\xi_{z_1} = \xi_x \quad (144)$$

и удовлетворяя граничному условию

$$v_{z_1|z=F_{z_1}} = v_{z_1,k}, \quad (145)$$

получим

$$v_{z_1} = v_{z_1,k} + \xi_{z_1}(z - F_{z_1}), \quad (146)$$

где $v_{z_1,k}$ определяется из формулы (10) при $\partial F_{z_1}/\partial y = 0$:

$$v_{z_1,k} = v_x \frac{\partial F_{z_1}}{\partial x} = v_x \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (147)$$

Окончательно из формулы (146) с учетом уравнений (144) и (147) имеем

$$v_{z_1} = \xi_x(F_{z_1} - z) + v_x \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (148)$$

Компоненты тензора скоростей деформаций на участке 1 определяем из уравнения (4):

$$\left. \begin{aligned} \xi_x &= v_1(1 - 1/\lambda)(30x^2/l^3 - 60x^3/l^4 + 30x^4/l^5); \\ \xi_{y_1} &= \xi_{xy_1} = \xi_{yz_1} = 0; \quad \xi_{z_1} = -\xi_x; \\ \xi_{xz_1} &= \frac{1}{2} \frac{\partial v_{z_1}}{\partial x}. \end{aligned} \right\} \quad (149)$$

На участке 2 представим v_{z_2} в виде

$$v_{z_2} = C_0 + C_1 z. \quad (150)$$

Поверхность верхнего валка F_{z_3} на участке 3 аппроксимируем поверхностью параболического цилиндра при длине очага деформации l

$$F_{z_3} = 0,5H_3 + 0,5(H_3 - h_3)x^2/l^2. \quad (151)$$

Используем граничные условия для v_{z_2} из уравнения (150):

$$v_{z_2|z=0} = 0; \quad v_{z_2|z=F_{z_3}} = v_{z_1|z=F_{z_3}}.$$

Тогда из формулы (150) следует:

$$v_{z_2} = \xi_{z_2}z; \quad \xi_{z_2} = (v_{z_1|z=F_{z_3}})/F_{z_3}. \quad (152)$$

Находя ξ_{y_2} из условия несжимаемости, определяем

$$v_{y_2} = -(\xi_x + \xi_{z_2})y + \varphi(x, z), \quad (153)$$

которая с учетом граничного условия $v_{y_2|y=0} = 0$ равна

$$v_{y_2} = -(\xi_x + \xi_{z_2})y. \quad (154)$$

Переходим далее к участку 3. Задаем $v_{z_3} = C_0 + C_1z + C_2z^2$ при граничных условиях

$$v_{z_3|z=0} = 0; \quad v_{z_3|z=z_0} = -v_{z_3|z=-z_0}; \quad v_{z_3|z=F_{z_3}} = v_{z_3,k}.$$

В результате получим

$$v_{z_3} = \xi_{z_3}z, \quad \xi_{z_3} = v_{z_3,k}/F_{z_3}, \quad (155)$$

где в соответствии с уравнением (10)

$$v_{z_3,k} = v_x \frac{\partial F_{z_3}}{\partial x} = v_x (h_0 - h_1) \frac{x}{l^2}. \quad (156)$$

Скорость v_{y_3} находим из условия несжимаемости с учетом граничного условия $v_{y_3} = v_{y_2}$ при $y = 0,5b_2$:

$$v_{y_3} = (\xi_x + \xi_{z_3})(0,5b_2 - y) - 0,5b_2(\xi_x + \xi_{z_2}). \quad (157)$$

Участок 4 деформируется за счет продольного растяжения. Для него принимаем [33]

$$\xi_{z_4} = \xi_{y_4} = 0,5\xi_x. \quad (158)$$

При граничном условии $v_{z_4} = 0$ при $z = 0$ имеем

$$v_{z_4} = \int \xi_{z_4} dz + \varphi(x, y) = -0,5 \xi_x z. \quad (159)$$

Определяем далее v_{y_4} при граничном условии $v_{y_4} = v_{y_3}$, при $y = 0,5b_{0x}$, где b_{0x} — уравнение бокового контура на стыке участков 3 и 4, с учетом уширения по длине очага деформации. Представляем приближенно b_{0x} в виде параболы

$$0,5b_{0x} = 0,5b_1 - (b_1 - b_0)x^2/2l^2. \quad (160)$$

Тогда с учетом граничного условия

$$\begin{aligned} v_{y_4} &= \int \xi_{y_4} dy + \varphi(x, z) = v_{y_3}|_{y=0,5b_{0x}} + \\ &+ \xi_x (0,25b_{0x} - 0,5y), \end{aligned} \quad (161)$$

где

$$v_{y_3}|_{y=0,5b_{0x}} = 0,5(\xi_x + \xi_{z_3})(b_2 - b_{0x}) - 0,5b_2(\xi_x + \xi_{z_2}). \quad (162)$$

Таким образом, мы определили кинематически возможное поле скоростей перемещений и деформаций. Необходимые компоненты ξ_{ij} определяются из уравнения (4). Вариационное уравнение для жесткопластической среды записывается в виде выражения (7) при ограничении (8).

Варьируемыми параметрами являются коэффициент вытяжки λ , коэффициент опережения $a_1 = v_1/v_s$ и коэффициент a_{kp} , определяющий положение продольно-вертикального критического сечения на среднем сильнообжимаемом участке профиля. Для того чтобы выразить неизвестные размеры профиля после прокатки через λ и a_{kp} , принимаем, что коэффициенты вытяжки необжимаемого участка по высоте и ширине равны, поскольку этот участок деформируется только за счет растяжения [33]:

$$1/\eta = 1/\beta = V\bar{\lambda}, \quad (163)$$

где $\beta = (b_4 - b_1)/(b_3 - b_0)$ — коэффициент вытяжки по ширине; $\eta = h_3/h_2$ — коэффициент вытяжки по высоте.

Используя условие постоянства объема и уравнение (22), получим

$$\left. \begin{aligned} b_1 &= [S_0 - (b_3 - b_0)h_2 - \lambda b_2 H_1 + \lambda b_2 h_1]/(\lambda h_1); \\ b_4 &= (b_3 - b_0 - b_1 V\bar{\lambda})/V\bar{\lambda}; \\ h_3 &= h_2/V\bar{\lambda}, \end{aligned} \right\} \quad (164)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения полосы до прокатки.

Рассматриваемая вариационная задача принадлежит к типу задач условной минимизации с ограничением типа равенства и решается с применением методов нелинейного программирования.

Для численного решения на ЭВМ применены методы, в которых используются понятия штрафной функции и множителей Лагранжа. С целью выявления метода условной минимизации, дающего наиболее быструю и устойчивую сходимость, испытаны методы штрафных функций с возрастающим параметром и без параметра Хестенса — Пауэлла и Моррисона. При решении задачи безусловной минимизации использован метод деформируемого многогранника Нелдера и Мида. Данные пробных вычислений свидетельствуют о большей эффективности метода Моррисона, который и выбран для всех дальнейших расчетов.

Программа минимизации мощности деформации при условии (8) написана на алгоритмическом языке Фортран-IV и реализована на ЭВМ ЕС-1033.

Программа численного решения вариационной задачи использовалась для получения регрессионных зависимостей

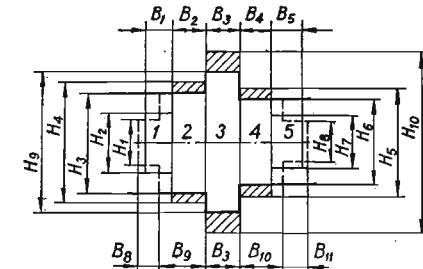


Рис. 31. Поперечный разрез очага деформации при прокатке в соответствующем калибре.

коэффициентов формоизменения и энергосиловых параметров от размеров соответственного профиля и калибра (рис. 31).

На основании теоретических исследований были получены формулы для вычисления коэффициента вытяжки λ и коэффициента уширения $\beta = (B_8 + B_9 + B_3 + B_{10} + B_{11})/(B_1 + B_2 + B_8 + B_4 + B_5)$:

$$\begin{aligned}\lambda &= 1,08 - 0,601m_1 + 0,951m_3 - 0,801m_4 + 2,165m_6 + \\&+ 0,214m_7 - 0,111m_8 - 0,138m_9 - 0,914m_{10} - 0,037m_{12} + \\&+ 0,13m_{13} - 0,182m_5^2 - 2,981m_6^2;\end{aligned}\quad (165)$$

$$\begin{aligned}\beta &= 1,103 - 1,262m_1 + 0,752m_2 - 1,031m_3 + 0,828m_4 + \\&+ 1,084m_5 - 1,157m_6 + 0,665m_7 - 0,72m_9 + 0,446m_{10} - \\&- 0,796m_{11} + 0,074m_{12} - 0,232m_{13} - \\&- 1,44m_5^2 + 3,114m_6^2 - 0,509m_7^2,\end{aligned}\quad (166)$$

где

$$\begin{aligned}m_1 &= H_2B_1/S_0; \quad m_2 = H_4B_2/S_0; \quad m_3 = H_5B_4/S_0; \quad m_4 = H_7B_5/S_0; \\m_5 &= \Delta H_4/H_4; \quad m_6 = \Delta H_{10}/H_{10}; \quad m_7 = \Delta H_5/H_5; \quad m_8 = B_1/B_0; \\m_9 &= B_2/B_0; \quad m_{10} = B_4/B_0; \quad m_{11} = B_5/B_0; \quad m_{12} = H_{10}/B_0; \\m_{13} &= H_{10}/R; \quad B_0 = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5; \\S_0 &= H_2B_1 + H_4B_2 + H_{10}B_3 + H_5B_4 + H_7B_5.\end{aligned}$$

Формулы (165) и (166) получены для следующей области изменения m_i : $0 \leq m_1 \leq 0,28$; $0 \leq m_2 \leq 0,47$; $0 \leq m_3 \leq 0,41$; $0 \leq m_4 \leq 0,25$; $0 \leq m_5 \leq 0,85$; $0,05 \leq m_6 \leq 0,5$; $0,03 \leq m_7 \leq 0,81$; $0 \leq m_8 \leq 0,41$; $0 \leq m_9 \leq 0,5$; $0 \leq m_{10} \leq 0,49$; $0 \leq m_{11} \leq 0,35$; $0,17 \leq m_{12} \leq 3,0$; $0,1 \leq m_{13} \leq 0,5$ при выполнении системы ограничений $\Delta H_4/H_4 \leq \Delta H_{10}/H_{10}$; $\Delta H_5/H_5 \leq \Delta H_{10}/H_{10}$; $H_2 \leq H_4 - \Delta H_4$; $H_7 \leq H_5 - \Delta H_5$; $H_4 - \Delta H_4 \leq H_{10} - \Delta H_{10}$; $H_5 - \Delta H_5 \leq H_{10} - \Delta H_{10}$; $B_2 \leq B_3$; $B_4 \leq B_3$.

ПРОВЕРЧНЫЙ РАСЧЕТ КАЛИБРОВКИ КРЕСТООБРАЗНОГО ПРОФИЛЯ 48×34×12×7 мм

Для расчета вначале определим размеры соответственных калибров и раскатов в каждом проходе, учитывая результаты опытной прокатки, проведенной по рассчитанной калибровке.

Калибр 1 (рис. 32). В качестве исходной заготовки взят

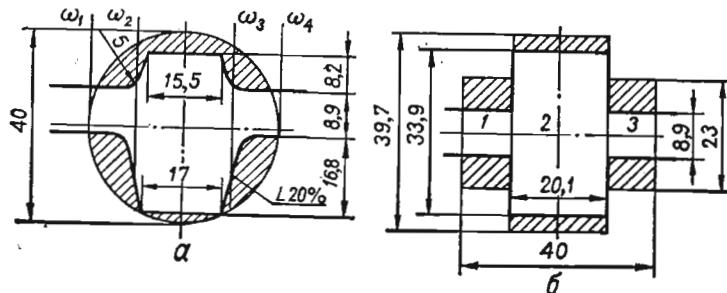


Рис. 32. Калибр 1 (а) и соответственный ему калибр (б) для прокатки крестообразного профиля.

круг диаметром 40 мм. Ширина соответственного калибра, таким образом, 40 мм.

Общая площадь калибра (рис. 32, а) $S_0 = 858,6 \text{ мм}^2$. Высоты участков 1, 2 и 3 соответственного калибра равны минимальной и максимальной высотам исходного калибра: $h_{k_1} = 8,9 \text{ мм}$; $h_{k_2} = 33,9 \text{ мм}$; $h_{k_3} = 8,9 \text{ мм}$.

Зная S_0 и высоты участков калибра (рис. 32, б), находим их ширины: $b_1 = \frac{h_{k_2}b - S_0}{2(h_{k_2} - h_{k_1})} = 9,95 \text{ мм}$; $b_2 = 20,1 \text{ мм}$; $b_3 = 9,95 \text{ мм}$.

Смещенные по высоте площади на участках 1, 2 и 3 $S_{h_1} = 140,3 \text{ мм}^2$; $S_{h_2} = 117,4 \text{ мм}^2$; $S_{h_3} = 140,3 \text{ мм}^2$. Определяем абсолютные обжатия и высоты участков соответственного раската: $\Delta h_1 = 14,1 \text{ мм}$; $\Delta h_2 = 5,8 \text{ мм}$; $\Delta h_3 = 14,1 \text{ мм}$; $h_1 = 23 \text{ мм}$; $h_2 = 39,7 \text{ мм}$; $h_3 = 23 \text{ мм}$.

В результате получаем соответственный калибр и раскат, представленные на рис. 32, б.

Калибр 2 (рис. 33). Исходный раскат получен прокаткой заготовки диаметром 40 мм в калиbre 1. Форма калибра здесь практически не отличается от соответственной, и поэтому раз-

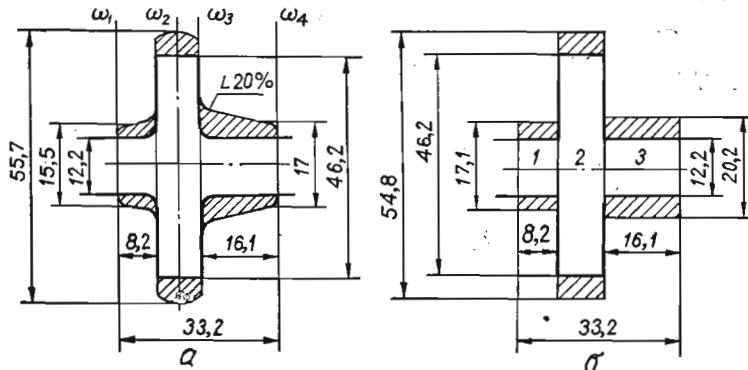


Рис. 33. Калибр 2 (а) и соответственный ему калибр (б) для прокатки крестообразного профиля.

меры соответственного калибра (рис. 33, б) равны: $b_1 = 8,2$ мм; $b_2 = 8,9$ мм; $b_3 = 16,1$ мм; $h_{k_1} = 12,2$ мм; $h_{k_2} = 46,2$ мм; $h_{k_3} = 12,2$ мм.

Находим абсолютные обжатия, используя равенство смещенных по высоте площадей на участках 1, 2 и 3 реального и соответственного раскатов: $S_{h_1} = 40,2 \text{ мм}^2$; $S_{h_2} = 76,3 \text{ мм}^2$; $S_{h_3} = 128,5 \text{ мм}^2$; $\Delta h_1 = 4,9$ мм; $\Delta h_2 = 8,6$ мм; $\Delta h_3 = 8,0$ мм.

Высоты участков соответственного раската $h_1 = 17,1$ мм; $h_2 = 54,8$ мм; $h_3 = 20,2$ мм.

Калибр 3 (рис. 34). Исходный раскат получен прокаткой круглой заготовки диаметром 40 мм в двух предыдущих калибрах. Ширины и высоты участков 1, 2 и 3 соответственного калибра (рис. 34, б) равны ширинам и высотам участков фактического калибра (рис. 34, а): $b_1 = 16,8$ мм; $b_2 = 12,2$ мм; $b_3 = 16,8$ мм; $h_{k_1} = 7$ мм; $h_{k_2} = 34,7$ мм; $h_{k_3} = 7$ мм.

Соответственный калибр, в отличие от исходного, симметричен относительно продольно-горизонтальной плоскости. Площади, смещенные по высоте, $S_{h_1} = 31,9 \text{ мм}^2$; $S_{h_2} =$

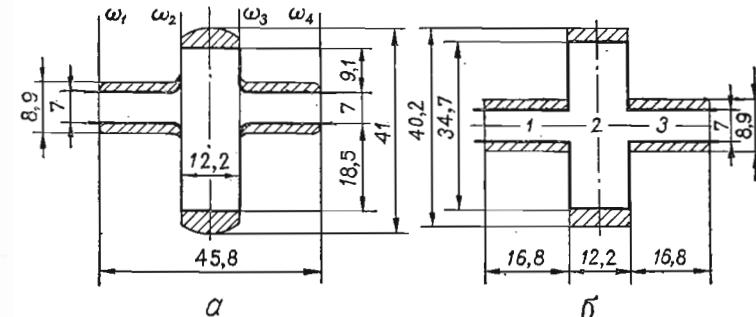


Рис. 34. Калибр 3 (а) и соответственный ему калибр (б) для прокатки крестообразного профиля.

$= 66,7 \text{ мм}^2$; $S_{h_3} = 31,9 \text{ мм}^2$ позволяют определить абсолютные обжатия и высоты участков соответственного раската: $\Delta h_1 = 1,9$ мм; $\Delta h_2 = 5,5$ мм; $\Delta h_3 = 1,9$ мм; $h_1 = 8,9$ мм; $h_2 = 40,2$ мм; $h_3 = 8,9$ мм.

По рассчитанной калибровке проведена опытная прокатка крестообразного профиля на стане 300 из заготовки круглого поперечного сечения с диаметром 40 мм. Марка стали заготов-

5. Экспериментальные и расчетные значения коэффициентов формоизменения при прокатке крестообразного профиля $48 \times 34 \times 12 \times 7$ мм

Номер прохода	Экспериментальные значения		Расчетные значения		Относительная ошибка, %	
	λ	β	λ	β	ε_λ	ε_β
1	1,31	1,39	1,32	1,38	3,5	3,5
2	1,22	1,24	1,23	1,23	4,5	4,5
3	1,18	1,06	1,19	1,05	4,5	4,5

ки — МСт3, температура прокатки перед первым проходом — 1100 °С. После каждого прохода взяты темплеты. В результате их измерений определены экспериментальные значения коэффициентов формоизменения в каждом калибре. Найденные размеры соответственных калибров и раскатов использованы для расчета коэффициентов формоизменения с помощью программы численного решения вариационной задачи, рассмотренной в настоящей главе. Опытные и расчетные данные незначительно отличаются друг от друга (табл. 5). Поэтому после опытной прокатки потребовалась лишь небольшая корректировка калибровки.



ГЛАВА 6 КОНСТРУКЦИИ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КЛЕТЕЙ

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ КЛЕТИ ДЛЯ ПРОКАТКИ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

Высокая эффективность способа прокатки двутавров с широкими и параллельными полками в четырехвалковых клетях с открытыми калибрами способствовала быстрому его распространению. В настоящее время он является основным способом производства этого вида металлоконструкций.

Известные и хорошо зарекомендовавшие себя конструкции четырехвалковых клетей для универсальных балочных станов совершенствовались на протяжении 120 лет, исходя из практических требований к прокатке двутавровых балок в широком сортаменте. Рабочие клети, используемые для прокатки широкополочных двутавров, относятся к числу наиболее сложных по конструкции прокатных клетей. Они имеют большие габариты (высота 3,5—4,5 м) и значительную массу (130—220 т). При проектировании этих клетей учитывались следующие основные особенности: значительные перемещения вертикальных валков, необходимые для прокатки двутавров в широком диапазоне по высоте; использование горизонтальных валков,

длина бочки которых может изменяться в больших пределах; большие усилия на вертикальные валки, которые могут достигать 60 % максимальных нагрузок на горизонтальные валки; высокая жесткость конструкции; быстрая замена валков и валковой арматуры.

Одной из наиболее сложных проблем при конструировании четырехвалковых рабочих клетей является создание станин, которые при минимальной их массе и габаритах отвечали бы одновременно всем перечисленным выше технологическим требованиям эксплуатации.

Известны четыре основных типа универсальных балочных клетей: с постоянным и изменяемым расстоянием между станинами, а также клети с разъемной предварительно-напряженной станиной.

Особенностью конструкции четырехвалковой клети любого типа является необходимость размещения вертикальных валков между шейками горизонтальных валков. При весьма ограниченных габаритах требуется установка корпусов подушек с подшипниками вертикальных валков достаточной прочности. Поэтому при конструировании обычно принимают все возможные меры для увеличения допустимых нагрузок на вертикальные валки за счет рациональной конструкции подшипниковых узлов и улучшения качества самих подшипников с целью достижения минимальных габаритных размеров подшипникового узла. Увеличение диаметра и других размеров горизонтальных валков вызывает, помимо повышения их расхода при эксплуатации, еще и увеличение габаритов клети, ее массы, грузоподъемности кранов, приводящее к удорожанию всего стана в целом.

Успехи, достигнутые при прокатке фасонных профилей в четырехвалковых калибрах, явились причиной быстрого изменения конструкции самой клети и особенно систем для перевалки вертикальных и горизонтальных валков. Первоначально на балочных станах применялась кассетная схема перевалки валков, которая и в настоящее время применяется в Японии на заводах «Такэсик» и «Сакай». Затем стали

использовать схему с поперечными балками, установленными в станинах закрытого типа (на заводах «Хиросима» и «Фукуяма»).

В настоящее время наиболее современной считается перевалка клетями, так как сокращается время перенастройки стана, освобождаются краны становового пролета и уменьшается их грузоподъемность, облегчается здание цеха, повышается точность проката за счет точной настройки валков и арматуры на стенах для сборки и разборки клетей. Перевалка клетями применяется на ряде универсальных балочных станов Японии (на заводах «Фукуяма», «Мидзусима», «Кимитсу») и других стран. Типовая клеть в этом случае состоит из станин горизонтальных валков закрытого типа, установленных на плитовинах; верхнего и нижнего нажимных устройств; гидроцилиндров подъема рельсов, по которым выкатываются клети с линии прокатки; горизонтальных валков с подушками, установленными в окнах станин; вертикальных валков с подушками, находящимися в откидных скобообразных элементах станицы, и нажимных устройств для перемещения вертикальных валков. Кроме того, в клети имеются проводковые устройства, фиксаторы скобообразных элементов относительно станин, уравновешивающие устройства верхнего горизонтального валка и другие вспомогательные устройства. При удалении клети с линии стана не требуется каких-либо операций по разборке самой клети. Лапы станицы горизонтальных валков относительно плитовин фиксируются с помощью гидродомкратов и клиновых зажимов.

Другим важным направлением развития конструкций универсальных клетей (в основном бесстанинных) является повышение их жесткости, что существенно влияет на точность проката. Наибольший интерес представляет [11] бесстаничная балочная клеть конструкции фирмы «Зимаг» (ФРГ), которая установлена на непрерывном балочном стане на заводе «Кимитсу». Клеть состоит (рис. 35) из горизонтальных и вертикальных валков с подушками; верхних и нижних поперечин, на которые опираются подушки верхнего и нижнего го-

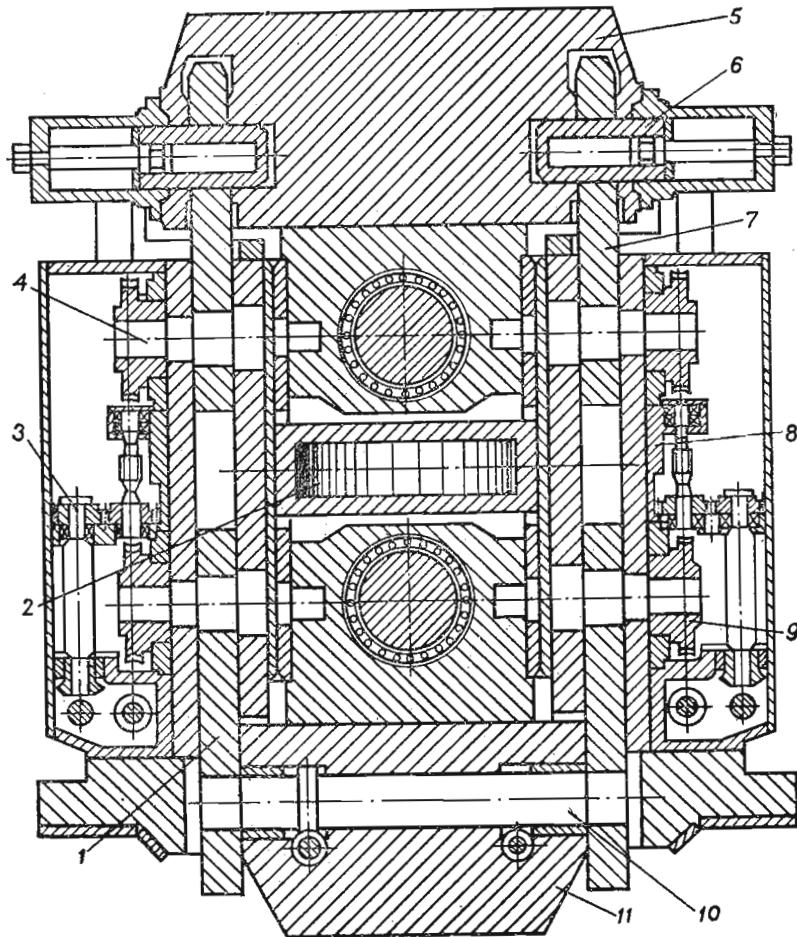


Рис. 35. Вертикальный разрез по подушкам бесстанинной универсальной клети.

ризонтального валков; боковых пластин, шарнирно связанных с поперечинами; эксцентриковых механизмов регулирования положения осей верхнего и нижнего горизонтального валков относительно оси прокатки; эксцентриковых механизмов регулирования положения вертикальных валков и гидродомкратов, с помощью которых рассоединяются шарнирные связи боковых пластин с поперечинами клети. Как видно из рис. 35, в верхних поперечинах 5 имеются прорези, в которые входят концы пластин 7. В этих концах имеются цилиндрические отверстия, соосно с которыми расположены отверстия в поперечине. В качестве оси шарнира использован шток 6 гидроцилиндра, корпус которого установлен на боковой поверхности поперечины.

Перевалка клети ведется по направляющим, установленным на стороне перевалки стана. Там же расположены тележки с установленными на них подготовленными к работе новыми клетями. При перевалке старая клеть выдвигается с линии прокатки на тележку, которая передвигается параллельно оси прокатки вместе с клетью, а новая клеть перемещается с тележки на линию прокатки.

При разборке клети на стенде в первую очередь освобождают верхние поперечины 5 от шарнирных связей, для чего шток устанавливается в корпусе гидроцилиндра. Так как подушки верхнего горизонтального валка прикреплены к верхней поперечине, то после удаления штока из цилиндрического отверстия в конце боковой пластины верхние поперечины поднимаются вместе с верхним горизонтальным валком вверх с помощью крана.

Вертикальные валки 2 с подушками крепятся аналогичным образом с помощью разборных шарниров к пластинам 8, которые служат тягами, воспринимающими давление металла на вертикальные валки. Подушки вертикальных и горизонтальных валков имеют увеличенную поверхность контакта в разъеме подушка — поперечина, что обеспечивает более равномерное распределение нагрузки на ролики подшипниковых валковых опор и повышает долговечность подшипников.

В верхних шарнирах пластин 7 установлены штоки, которые могут перемещаться вдоль своей оси, но выполнены вращающимися. В нижних шарнирах пластин 1, связанных с нижними поперечинами 11, установлена эксцентриковая ось 10, которую вращают вручную с помощью червячной передачи. Этот механизм используют для настройки оси четырехвалкового универсального калибра относительно оси прокатки.

Кроме того, имеется еще один эксцентриковый механизм сближения и разведения верхнего и нижнего горизонтального валков относительно друг друга, причем это движение ведут строго синхронно. Для этого используют вращение эксцентриковых полуосей 4, установленных в концах пластин 7 и 1 и приводящихся во вращение с помощью червячных колес 9. С помощью червяков, находящихся в зацеплении с колесами 9, промежуточных валов и электропривода с редуктором достигается синхронное вращение всех полуосей. Вертикальные валки 2 при этом остаются на месте.

Аналогично устроены эксцентриковые механизмы перемещения вертикальных валков, с помощью которых также строго синхронизируется перемещение валка относительно оси прокатки. На рис. 35 эти механизмы не изображены, но видны цилиндрические и червячные передачи с промежуточными валами 3, которые используются для синхронного вращения эксцентриковых полуосей механизмов осевого регулирования вертикальных валков. Полуоси имеют эксцентриситет, равный 22,5 мм. Скорость перемещения вертикального валка при настройке составляет 0,49 мм/с, скорость перемещения горизонтальных валков при настройке межвалкового зазора на один валок — 0,26 мм/с. Эксцентриковые механизмы настройки зазоров между вертикальными и горизонтальными валками используются не только для регулирования, но и для выборки люфтов.

Крепление универсальных клетей к плитовинам в линии стана при прокатке происходит с помощью быстродействующих гидродомкратов, которые при выдвижении клети с линии

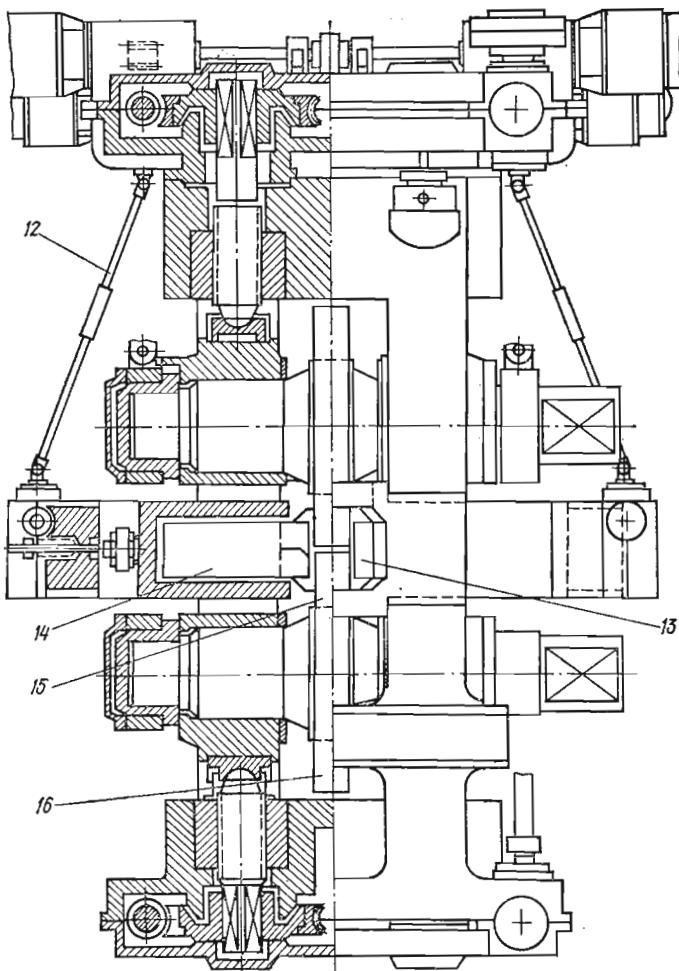
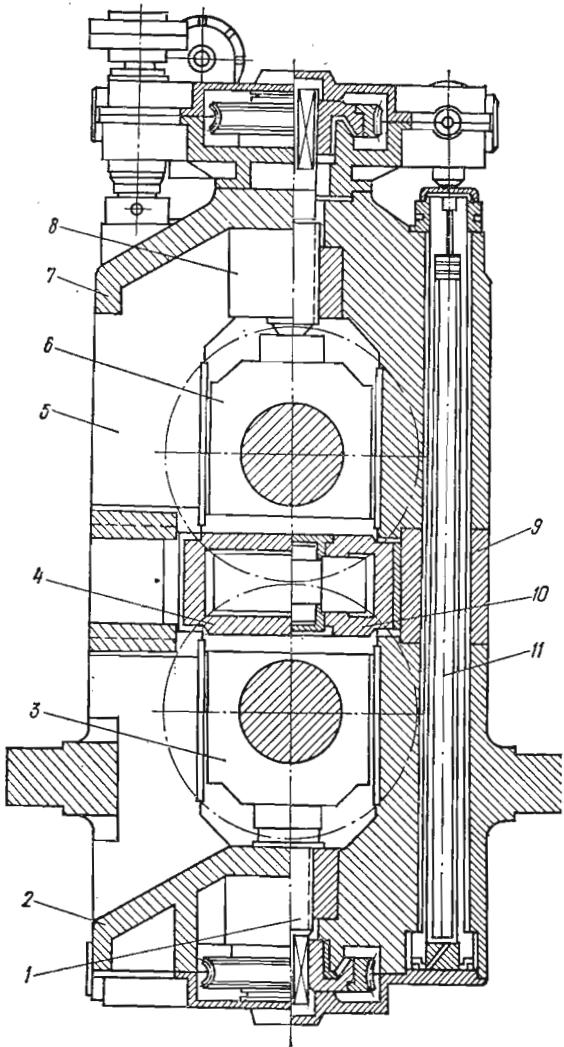


Рис. 36. Четырехвалковая клеть с разъемной предварительно-напряженной станиной.

остаются на плитовинах. Клети с линии стана выдвигают на тележки с помощью реечной передачи и тележки с приводом от электродвигателя. Скорость движения клети при перевалке 0,1 м/с, длина хода 12,5 м.

Для прокатки широкополочных двутавров в небольшом диапазоне изменений их размеров по высоте фирмой «Мюллер унд Нойманн» (ФРГ) разработана четырехвалковая клеть с **разъемной** предварительно-напряженной станиной (рис. 36). Клеть состоит из верхнего 7 и нижнего 2 монолитных П-образных блоков-станин для установки горизонтальных валков и кассеты 5 закрытого типа для вертикальных валков, которые стягиваются между собой четырьмя гидроболтами 11. В блоках имеются направляющие, по которым перемещаются подушки 6 и 3 горизонтальных валков 15 и 16. Вертикальные неприводные валки 14 и 13 установлены в подушках 4 и 10, которые в свою очередь расположены в общем корпусе кассеты. Он является общей промежуточной частью для верхнего 7 и нижнего 2 П-образных блоков-станин и прочно затягивается между блоками через прямоугольные надставки 9. Необходимые зазоры между вертикальными и горизонтальными валками устанавливаются двигателями через червячные передачи установочных винтов 8 и 1 горизонтальных валков, а также при помощи наклонных телескопических валов 12. При сборке клети корпус кассеты устанавливают между блоками, а затем с помощью четырех стяжных гидроболтов стягивают блоки и кассету с усилием, в два раза превышающим максимальное давление металла на горизонтальные валки. При этом жесткость клети по горизонтальным валкам становится равной жесткости аналогичной клети закрытого типа при почти вдвое меньшей массе станины. Клети такой конструкции, изготовленные для комбинированного балочного стана в Фельклингене (ФРГ) при диаметре рабочих валков 950 мм имеют массу около 58 т. Масса универсальной клети обычного типа в этом случае составляет 130—180 т.

Представляет интерес конструкция четырехвалковых клетей непрерывного среднесортного стана 450 Западно-Сибирско-

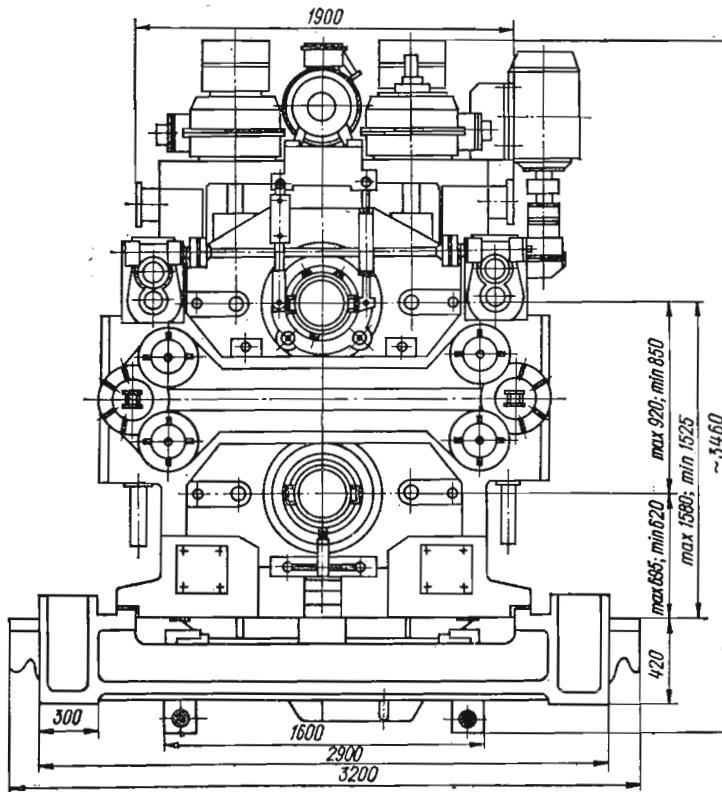


Рис. 37. Четырехвалковая балочная клеть стана 450 ЗСМЗ.

го металлургического завода (ЗСМЗ). Клети изготовлены Ждановским заводом (ЧССР). Универсальные клети стана 450 предназначены для прокатки тонкостенных двутавровых балок с параллельными полками и швеллеров № 16—30. Клеть бесстанинного типа состоит из четырех монолитных восьмигранных подушек, установленных в раме (рис. 37). Подушки

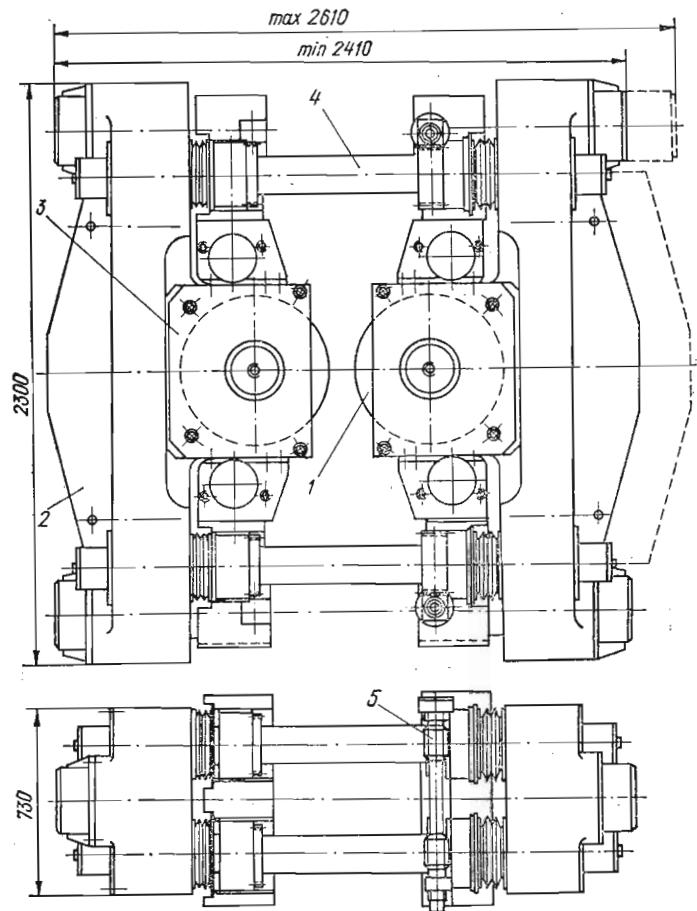


Рис. 38. Кассета с вертикальными валками универсальной клети стана 450 ЗСМЗ.

стягиваются между собой четырьмя массивными стяжными болтами. Диаметр горизонтальных валков 900 мм, а неприводных вертикальных — 600 мм. Для уравновешивания верхнего и нижнего горизонтальных валков применены гидравлические амортизаторы. Верхний горизонтальный валок имеет осевую регулировку в пределах ± 5 мм. Радиальная регулировка неприводных вертикальных валков позволяет изменять зазор между ними от 100 до 300 мм.

Вертикальные валки 1 установлены в кассете (рис. 38), которая представляет собой две траверсы 2, выполненные за одно целое с корпусами подушек 3 валков. Траверсы соединены между собой четырьмя штангами 4, которые закреплены в раме клети с размещенным на них механизмом 5 радиальной регулировки вертикальных валков. В зависимости от направления вращения штанги, траверсы с корпусами подушек вертикальных валков перемещаются, изменяя зазор между валками. Вертикальный валок выполнен в виде бандажа (кольца) с наружным диаметром 600 мм и внутренним — 360 мм, ширина бандажа 170 мм. Подшипниковый узел вертикального валка включает неподвижную ось диаметром 200 мм и два радиально-упорных роликовых подшипника, а также уплотнения. Монтируется вертикальный валок в цилиндрическом углублении корпуса траверсы, которое сверху закрывается крышкой.

ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫЕ КЛЕТИ ДЛЯ ПРОКАТКИ МЕЛКОСОРТНЫХ ПРОФИЛЕЙ

Исходя из требований, предъявляемых к основному оборудованию для горячей прокатки мелкосортных фасонных профилей в широком сортаменте, четырехвалковая клеть должна отличаться простотой и компактностью, вписываться в схему расположения технологического оборудования действующих станов, быть мобильной при переналадках в процессе эксплуатации, а также иметь достаточный запас регулировки системы горизонтальных и вертикальных валков как в осевом, так и в радиальном направлениях.

Отличительными особенностями известных конструкций балочных универсальных клетей по сравнению с обычными сортовыми клетями дуо являются: большие расстояния между осями горизонтальных валков (900—1300 мм), большие габариты (высота 3,5—4,5 м) и масса рабочих клетей (130—220 т), а также сложность конструкции.

Простое масштабное уменьшение уже отработанных и хорошо зарекомендовавших себя конструкций универсальных балочных клетей применительно к мелкосортным станам не приемлемо. Кроме того, для прокатки сложных профилей в широком сортаменте четырехвалковые балочные клети не отвечают всем требованиям прокатки сложных профилей из-за отсутствия осевой регулировки вертикальных валков в процессе прокатки.

Магнитогорский горно-металлургический, Челябинский политехнический и Днепродзержинский индустриальный институты выполнили работы по исследованию формоизменения металла в многовалковых калибрах, а также разработали ряд конструкций четырехвалковых клетей для прокатки мелкосортных профилей и катанки. В Челябинском политехническом институте под руководством В. Н. Выдрина разработана серия конструкций клетей с многовалковыми калибрами различного назначения.

Одноклетевые прокатные станины 150/250 и 280/475 предназначены для холодной прокатки (калибровки) фасонных профилей сечением соответственно до 400 и 1600 мм², вписывающихся соответственно в квадраты 20 и 40 мм. По конструкции станины аналогичны.

Рабочая клеть стана 280/475 (рис. 39) состоит из следующих основных узлов: станины 3, опорных горизонтальных 1 и вертикальных 2 валков, кассеты с рабочими неприводными валками, нажимного устройства, вводной и выводной валковой арматуры. Крутящий момент к приводным опорным горизонтальным валкам передается от шестеренной клети с начальным диаметром окружности, равным 800 мм. Мощность привода 160 кВт, скорость прокатки до 1,5 м/с, максимальное усилие

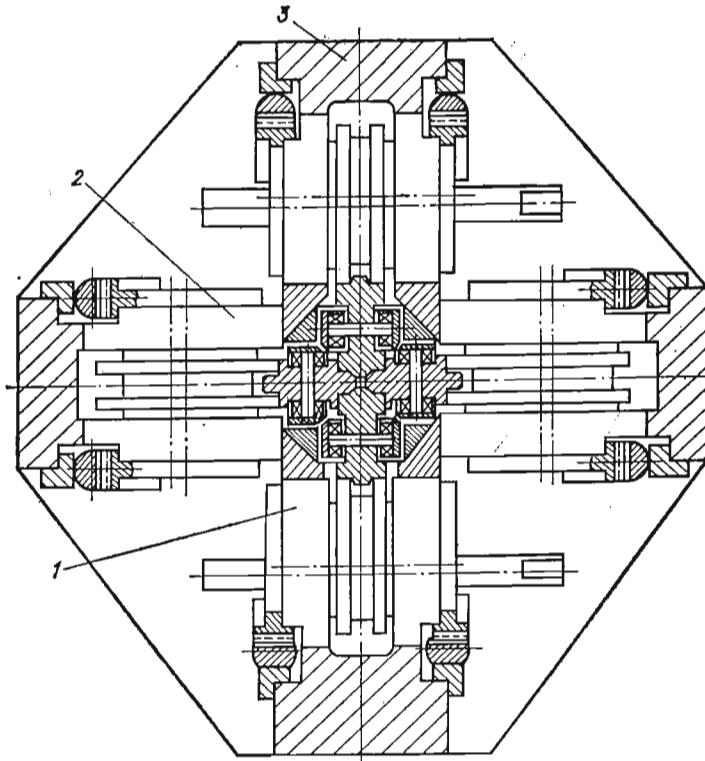


Рис. 39. Четырехвалковая клеть 280/475.

прокатки 70 т. Станина рабочей клети (рис. 39) — моноблочная, закрытого типа, с цилиндрическими расточкиами для установки горизонтальных и вертикальных опорных валков, гидроцилиндров, фиксаторов и упоров. В центре станины выполнена крестообразная расточка для установки кассеты с рабочими валками. Клеть имеет два приводных опорных горизонтальных валка диаметром 400 мм и два опорных неприводных вертикальных валка диаметром 475 мм.

Горизонтальный опорный валок состоит из бандажа, посаженного на вал и закрепленного от проворачивания на валу шпонкой, двухрядных сферических роликоподшипников, подушек, крышек-шестерен и крепежных деталей. Регулировка

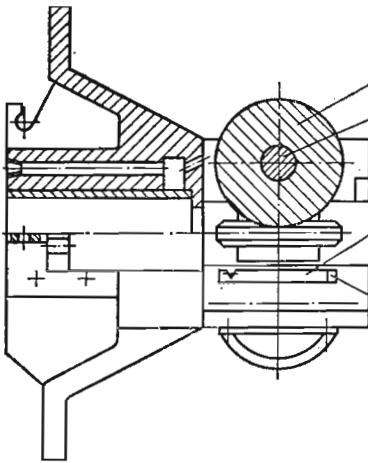


Рис. 40. Кассета с рабочими валками клети 280/475.

зазоров в лабиринтных уплотнениях и подшипниках осуществляется наборами кольцевых прокладок и гайками. Подушки и крышки-шестерни, кроме основного своего назначения (размещения и крепления подшипников), служат также для регулировки положения опорных валков. С этой целью отверстия под подшипники в подушках опорных валков выполнены эксцентрично наружным поверхности с эксцентризитетом 20 мм. Синхронность поворота подушек обеспечивается планкой, которая устанавливается в прямоугольной выемке подушек и крепится к ним болтами.

Для установки опорных валков при перевалках в исходное положение на наружных цилиндрических поверхностях подушек профрезерованы шпоночные пазы, угловое расположение которых по отношению к зубчатым секторам крышок-шестерен одинаково для опорных валков.

Конструкция вертикальных опорных валков аналогична горизонтальным и отличается лишь тем, что они неприводные.

Рабочие валки клети 280/475 устанавливаются в кассету (рис. 40). Максимальный опорный диаметр горизонтальных валков 257,5 мм, а вертикальных — 160 мм. Привод рабочих

валков фрикционный. Кассеты выполнены двух типов: на игольчатых подшипниках качения или подшипниках скольжения, которые устанавливаются на опорные диаметры рабочих валков. Корпус кассеты литой и имеет прямоугольные окна для размещения узлов рабочих валков, отверстия и кольцевую расточку для подвода охлаждающей жидкости к рабочим валкам, проушину и отверстия для крепления скобы.

Узел рабочего валка на подшипниках качения состоит из бандажа 1, оси 2, игольчатых подшипников, колец и подушек. Фиксация узлов рабочих валков в прямоугольных окнах корпуса кассеты осуществляется планками 3 и болтами 4.

Нажимное устройство эксцентрикового типа с приводом от гидроцилиндров предназначено для сборки и сжатия калибра в клети, компенсации износа и переточек опорных и рабочих валков. Оно включает в себя гидроцилиндры, рейки, крышки-шестерни, подушки и упоры. Каждой подушке соответствует свой гидроцилиндр. Штоки гидроцилиндров связаны с зубчатыми рейками, которые находятся в постоянном зацеплении с крышками-шестернями опорных валков. При перемещении штока гидроцилиндров подушки поворачиваются в расточках станины и оси опорных валков перемещаются по окружности с радиусом 20 мм в направлении к оси прокатки. При этом происходит сжатие калибра.

Упоры предназначены для предотвращения смещения центра калибра по отношению к оси прокатки при сборке и сжатии калибра, а также для регулирования усилия предварительного нагружения клети по горизонтальной и вертикальной осям клети.

Четыре рабочих валка монтируют в кассете в «замок». Размер калибра не регулируется и определяется точностью изготовления рабочих валков и погрешностями взаимного положения посадочных поверхностей «замка».

Для устранения осевых перемещений опорных валков клети одна из подушек каждого опорного валка прижимается к станине фиксаторами. Водная арматура скольжения устанавливается в центральную расточку кассеты и предназначается для

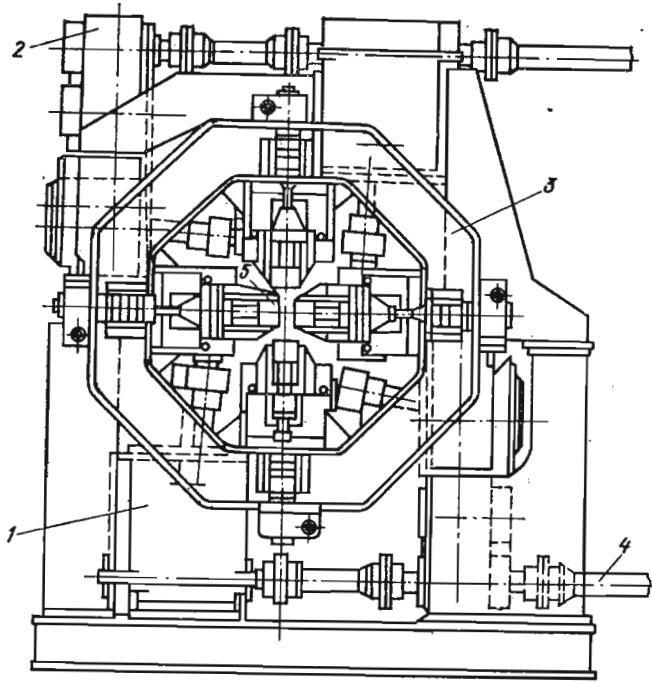


Рис. 41. Обжимная четырехвалковая клеть.

задачи полосы в калибр. Выводная арматура скольжения, предназначенная для съема полосы с валков и отведения ее из очага деформации, устанавливается на брусе, закрепленном на задней стороне рабочей клети.

Известна конструкция обжимной клети с четырехвалковым калибром фирмы «Кокс» (ФРГ) (рис. 41). Она состоит из восьмиугольной кольцеобразной станины 3, в которой размещены подушки вертикальных и горизонтальных валков, а также механизмы радиального перемещения валков. Все

подушки имеют одинаковые габариты, так как диаметры горизонтальных и вертикальных валков равны. Станина с установленными в ней подушками валков закреплена между вертикальными стойками (тумбами). Особенность конструкции данной клети заключается в том, что все валки являются приводными. В вертикальных тумбах расположены редукторы 1 и 2, через которые и осуществляется индивидуальный привод валков. Для передачи крутящего момента на горизонтальные валки используются редукторы 2 с цилиндрическими шестернями. Крутящий момент на вертикальные валки передается от приводного вала через раздаточную муфту и угловые редукторы 1. Применение угловых редукторов с коническими шестернями в системе привода вертикальных валков является слабым местом данной конструкции. Разработка обжимной клети с четырьмя приводными валками привела к увеличению высоты клети и к значительному увеличению расстояния между осями приводных валков 4, что увеличивает также высоту шестеренной клети.

Магнитогорский горно-металлургический институт спроектировал и изготовил непрерывный двухклетевой блок с четырехвалковыми калибрами [25]. Блок предназначен для горячей прокатки мелкого сорта и катанки, а также для холодной и теплой прокатки проволоки диаметром 2,5—3,5 мм. Он состоит из двух однотипных клетей, привод каждой клети индивидуальный. Угол взаимного поворота вертикальных осей рабочих клетей составляет 45° , что исключает кантовку прокатываемой полосы. Рабочая клеть блока состоит из литой станины, в пазах которой размещаются приводные и холостые валки в сборе с подшипниками узлами. Диаметр каждого валка 250 мм. Радиальная регулировка зазора между приводными валками по вертикали и холостыми по горизонтали осуществляется нажимными клиновыми устройствами, осевая — перемещением винтовых крышек, закрывающих подшипники. Блок испытан на стане 250 № 1 Магнитогорского металлургического комбината при прокатке круглой стали диаметром 14 мм и показал положительные результаты.

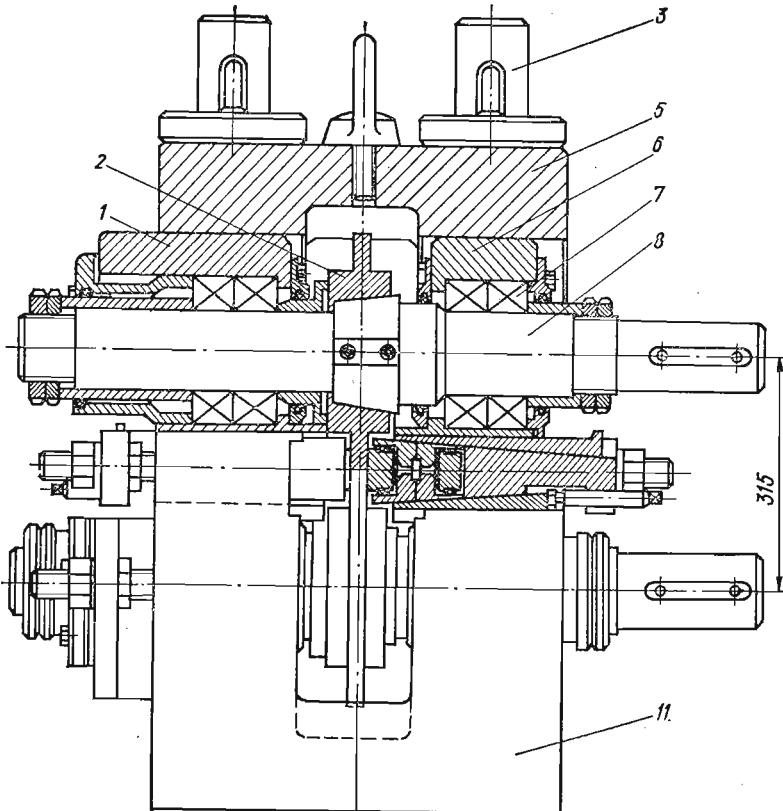
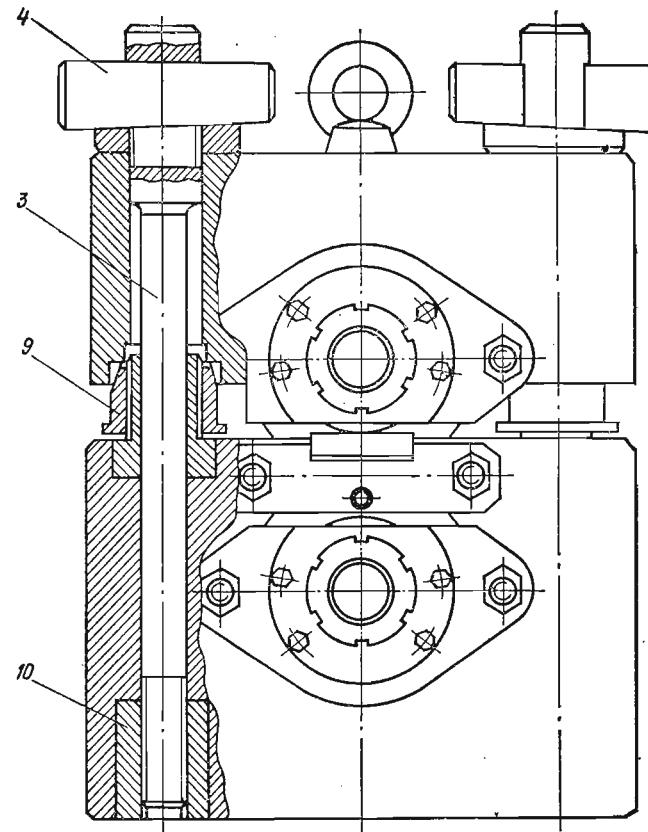


Рис. 42. Четырехвалковая клеть с винтовыми домкратами.

Днепродзержинским индустриальным институтом при проектировании конструкции четырехвалковой клети для прокатки мелкосортных профилей были проработаны варианты клетей станинного и бесстанинного типов. Учитывая, что клети бесстанинного типа позволяют уменьшить габариты



и массу рабочей клети в 2—2,5 раза, а также значительно сократить число деталей в клети, предпочтение отдано варианту клети бесстанинного типа.

Разработанная четырехвалковая предварительно напряженная клеть 300 бесстанинного типа конструкции Днепродзержинского индустриального института (рис. 42) предназ-

начена для горячей прокатки мелкосортных фасонных профилей с габаритными размерами до 50×50 мм. Допускаемое давление металла на горизонтальные валки 40 т, на вертикальные — 10 т.

С целью уменьшения габаритов клети и упрощения ее конструкции отношение диаметра горизонтальных валков к диаметру вертикальных принято равным 2,5.

Клеть состоит из двух литых П-образных блоков 5 и 11 (верхнего и нижнего), каждый из которых представляет собой две массивные подушки, соединенные толстостенной перемычкой. В подушках блоков размещаются корпуса подшипниковых узлов 1 и 6 горизонтальных рабочих валков.

Верхний и нижний П-образные блоки скрепляются между собой четырьмя массивными стяжными штангами 3 с усилием, превышающим давление металла на валки при прокатке, и составляют замкнутую силовую систему. Предварительное напряжение стяжных штанг осуществляется с помощью клиньев 4.

Нижний П-образный блок подушек крепится к основанию клети болтами и отличается от верхнего наличием двух прямоугольных пазов под корпуса кассет с вертикальными валками, выполненных соосно круглым отверстием под валковые опоры, и четырех гаек 10 стяжных штанг 3, установленных в вертикальных отверстиях блока.

Валковые опоры горизонтальных валков выполнены на подшипниках качения и представляют собой круглые корпуса подшипниковых узлов 1 и 6, в которых установлены по два радиально-упорных подшипника 7 с коническими роликами.

Со стороны кассет с вертикальными валками корпуса подшипников имеют сегментные срезы, образующие плоскости. Между ними фиксируется кассета, корпус которой имеет прямоугольное сечение.

Конструкция клети предусматривает использование цельных и бандажированных горизонтальных рабочих валков. Особенностью данной клети является возможность замены ра-

бочих бандажей 2 горизонтальных валков без извлечения оси составного валка 8 из клети, что значительно сокращает продолжительность перевалки клети.

В разработанной конструкции четырехвалковой клети отсутствуют специальные нажимное и уравновешивающее устройства верхнего горизонтального валка. Зазор между горизонтальными валками изменяется путем подъема или опускания верхнего блока подушек 5 относительно нижнего 11 с помощью четырех винтовых домкратов 9, на которые опирается верхний блок подушек 5. При соответствующем вращении гаек домкратов верхний блок опускается или поднимается. В случае необходимости изменения зазора клинья 4 выбираются из штанг 3, а после установки требуемого зазора между горизонтальными валками осуществляется предварительное напряжение клети с помощью клиньев.

Кассета с неприводным вертикальным валком (рис. 43) представляет собой в плане массивный Т-образный корпус 2 с лапами, в которых выполнены овальные отверстия. Посредине корпуса сверху и снизу сделаны продольные широкие клинообразные пазы, соответствующие уклону и ширине опорных клиньев 3. Нижний опорный клин может перемещаться вдоль корпуса кассеты с помощью винта. Узел крепления вертикального валка 5 в кассете выполнен разъемным. Рабочий конец корпуса и съемная крышка 1 снабжены кольцевыми выточками, диаметр которых превышает диаметр валка на 3—5 мм, и цилиндрическими выступами (цапфами), соответствующими

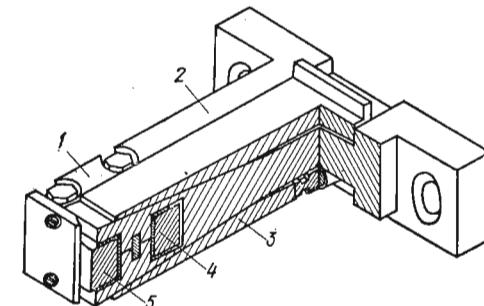


Рис. 43. Кассета с неприводным вертикальным валком.

внутреннему диаметру подшипника 4. Съемная крышка крепится к корпусу болтами.

При установке в клеть кассета вместе с опорными клиньями заводится в прямоугольный паз нижнего блока клети между подушками верхнего и нижнего горизонтальных валков таким

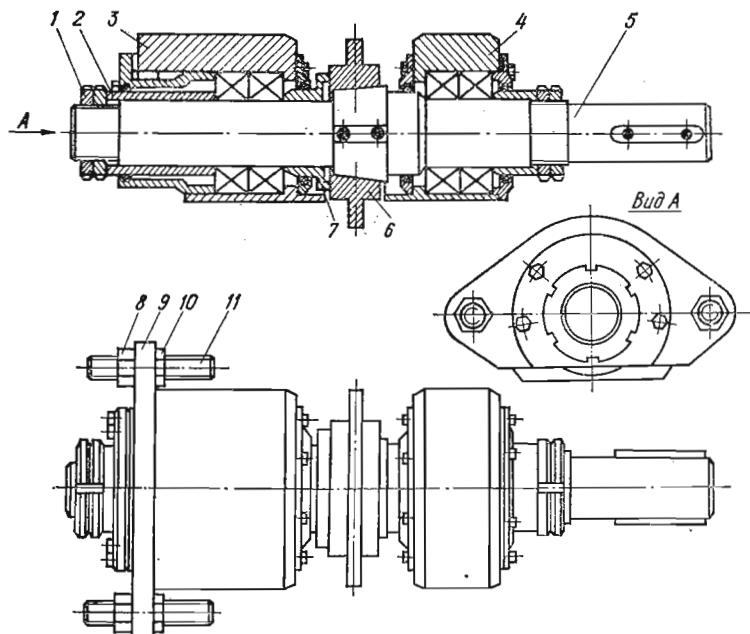


Рис. 44. Горизонтальный валок в сборе.

образом, чтобы шпильки вошли в овальные отверстия лап кассеты. Необходимая установка вертикального валка по высоте выполняется соответствующим перемещением нижнего опорного клина с помощью винта, а установка требуемого зазора между валками — перемещением кассеты вдоль паза при помощи гаек, расположенных на шпильках. После уста-

новки вертикальных валков в необходимом положении верхний опорный клин перемещают в направлении калибра до упора. При этом образуется жесткая силовая система — подушки горизонтальных валков и кассета. При необходимости перстройки четырехвалкового калибра в процессе прокатки вначале выбивается верхний опорный клин, а затем выполняется необходимая регулировка калибра.

С целью уменьшения расхода валков и трудозатрат на их изготовление, а также сокращения времени на перевалку валков разработанная четырехвалковая клеть предусматривает в основном использование составных (бандажированных) горизонтальных валков (рис. 44). Ось 5 составного валка имеет конусную посадочную поверхность, на которую с помощью втулок 7, 1 и гаек 2 с натягом устанавливается бандаж 6 и закрепляется на оси от поворачивания шпонкой. Окна для валковых опор в блоках клети и корпуса 3 и 4 подшипников выполнены круглыми (диаметр 325 мм). Корпуса могут перемещаться вдоль окна по скользящей посадке. Левый корпус подшипников в отличие от правого имеет фланцы 9 и большую длину. Осевая регулировка горизонтального валка (± 20 мм) осуществляется за счет перемещения левого корпуса 3 через фланцы 9 с помощью гаек 8 и 10 вдоль шпилек 11, ввернутых в нижний блок клети. Правый корпус 4 подшипникового узла не крепится в клети и при осевом перемещении валка совершает соответствующее движение вдоль окна (см. рис. 41).

Одним из недостатков известных конструкций четырехвалковых клетей, в том числе и универсальных балочных, является значительная продолжительность и трудоемкость замены рабочих валков.

Достоинством четырехвалковой клети разработки Днепродзержинского индустриального института является возможность замены рабочего бандажа без извлечения оси валка из клети. Замена бандажа осуществляется следующим образом (рис. 45): выбиваются клинья 3 стяжных болтов клети; вынимаются кассеты вертикальных валков; на втулку 5 оси 4 валка надевается стопорная планка и затем крепится к верх-

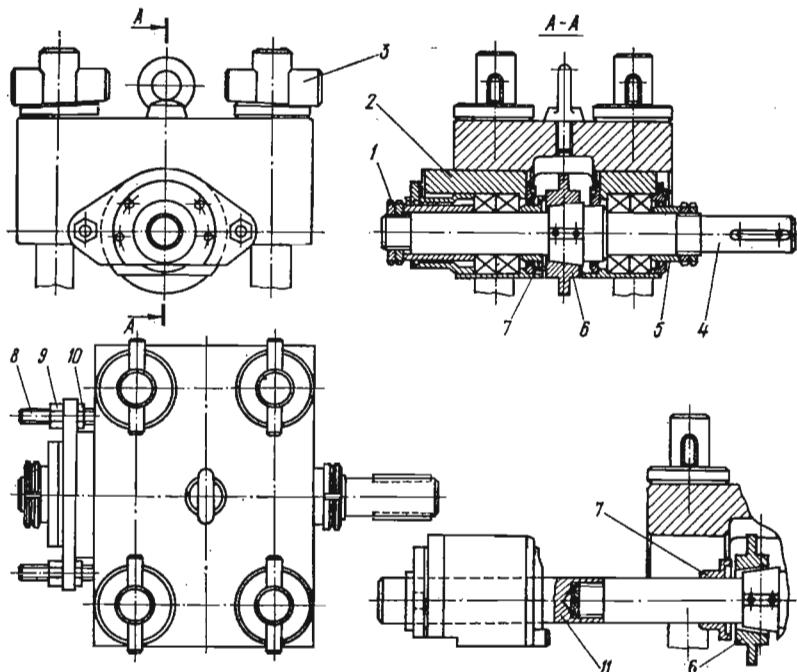


Рис. 45. Схема замены бандажа в четырехвалковой клети.

нему блоку клети гайками; откручиваются гайки 1 и 9 и присоединяется к оси 4 валка удлинитель 11 оси валка; вращением гаек 10 относительно шпилек 8 вынимается левый корпус 2 подшипникового узла из окна верхнего блока клети и затем снимается с удлинителя 11 оси валка; через окно извлекается прижимная втулка 7; бандаж 6 с помощью рычага страгивается с посадочного места и затем выводится из окна блока клети.

В ходе выполнения операций по замене рабочего бандажа подушка валковой опоры приводной шейки валка из клети не

вынимается. Следует отметить, что подшипниковый узел левой опоры при снятии с клети не разбирается и не подвергается какой-либо дополнительной регулировке.

Установка нового бандажа и сборка составного валка выполняются в обратной последовательности.

Испытание данной конструкции четырехвалковой клети 300 проводилось на трехклетевом полупромышленном стане 300. Горячая прокатка ряда сложных профилей специального назначения с использованием чистовой четырехвалковой клети показала работоспособность основных ее узлов и возможность прокатки фасонных профилей с достаточно высокой точностью формы и размеров.

Выполненные исследования горячей прокатки сложных мелкосортных профилей показали, что клети данной конструкции наиболее целесообразно использовать в цехах, специализирующихся на производстве фасонных профилей высокой точности малотоннажными партиями. Эти цехи обычно оснащены малоклетевыми прокатными станами горячей прокатки, на которых затруднено получение фасонных подкатов сложной формы под последующую холодную деформацию. Применение только одной четырехвалковой клети позволит резко сократить число фасонных проходов, что весьма важно при прокатке малотоннажных партий проката, а также получить сложные профили, которые практически невозможно прокатывать в двухвалковых калибрах.

На основании опыта эксплуатации к недостаткам вышеописанной четырехвалковой клети 300 бесстанинного типа следует отнести сложность изменения зазора между горизонтальными валками в процессе прокатки. Для изменения зазора вначале требуется выбрать клинья из стяжных штанг и расслабить верхние опорные клинья кассет вертикальных валков, а затем выставить необходимый зазор (опустить или поднять верхний блок клети) с помощью четырех опорных гаек винтовых домкратов. После корректировки зазора между горизонтальными валками необходимо выполнить вышеуказанные операции в обратном порядке.

Выявленный недостаток четырехвалковой клети 300 устранен в новой конструкции клети, которая по габаритам и техническим характеристикам аналогична четырехвалковой клети 300 (см. рис. 42).

Новая клеть состоит из верхнего 5 и нижнего 8 П-образных блоков (рис. 46). Для валковых опор в верхнем блоке выполнены круглые окна, а в нижнем — прямоугольные. Между блоками клети устанавливаются монолитные рамы 6. На концах рам сделаны отверстия под стяжные болты 4, а посередине рамы перпендикулярно к оси прокатки — сквозные окна прямоугольного сечения, в которые по скользящей посадке устанавливаются кассеты 2 с вертикальными валками 3. Конструкции кассет приведены на рис. 43. Высота окна в раме 6 больше толщины кассеты 2 на величину осевой регулировки вертикального валка 3. Верхний горизонтальный валок имеет круглые корпуса подшипниковых узлов и в сборе аналогичен валку, показанному на рис. 44. Подушки 7 валковых опор нижнего валка — прямоугольного сечения и могут перемещаться по высоте окна нижнего блока клети с помощью нажимного устройства 1 клинового типа. В рабочем состоянии верхний блок 5 клети, рамы 6 и нижний блок 8 сжаты между собой четырьмя стяжными болтами 4 с усилием, значительно превышающим максимальное усилие металла на валки в процессе прокатки. При работе клети зазор между горизонтальными валками изменяется с помощью нижнего нажимного устройства. Осевая и радиальная регулировка положения вертикальных валков аналогична регулировке валков клети, приведенной на рис. 42. Существенным преимуществом данной четырехвалковой клети является независимая регулировка горизонтальных и вертикальных валков клети без снятия предварительного сжатия верхнего и нижнего блоков клети.

Серьезной проблемой при разработке четырехвалковых клетей для прокатки сложных профилей является необходимость создания осевой регулировки вертикальных валков в процессе прокатки. В клетях (см. рис. 42 и 46) она решена с помощью подвижных упорных клиньев. Известно техническое

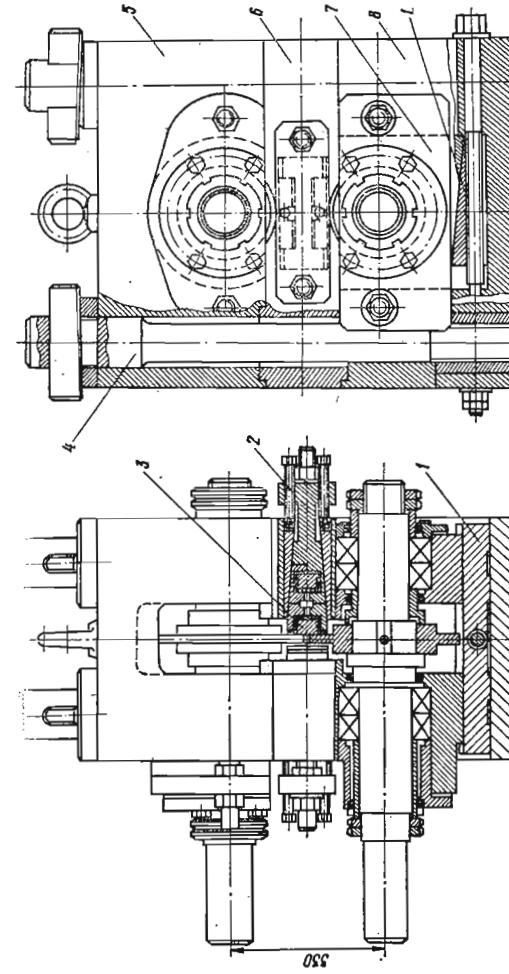


Рис. 46. Четырехвалковая клеть бесстаничного типа с нажимным устройством клинового типа.

решение осевой регулировки вертикального валка с помощью винта с двухконусной головкой и обоймы валка, в которой сделан наклонный паз [1], а также с помощью кассеты, у которой обойма вертикального валка выполнена в виде цилиндра, установленного в эксцентриковой втулке [2].

Следует отметить [23], что оптимальные конструктивные параметры прокатных станов с четырехвалковыми калибрами пока еще достаточно четко не сформулированы из-за отсутствия статистических данных. Широкое внедрение прокатки фасонных профилей с использованием четырехвалковых калибров позволит определить перспективные пути развития данных прокатных станов и область их применения в зависимости от программы и конкретных условий производства фасонных профилей.

КАССЕТЫ С НЕПРИВОДНЫМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ВАЛКАМИ

Для образования четырехвалкового калибра в типовой клети дуо или трио на бочке горизонтальных валков растачиваются выточки, которые в рабочем положении валков образуют проемы для установки в них корпуса кассеты с неприводными вертикальными валками (рис. 47). При этом на бочке горизонтального валка нарезается только один калибр. Такая расточка валков сопровождается большим объемом вальцетокарных работ и значительным расходом валков. Поэтому для создания четырехвалковых калибров в клетях дуо или трио наиболее рационально использовать составные (бандажированные) валки, позволяющие значительно уменьшить расход валков и продолжительность расточки.

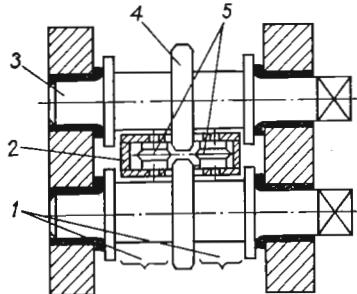


Рис. 47. Схема установки кассеты с вертикальными валками в клети дуо:

1 — выточки на валках; 2 — корпус кассеты; 3 — горизонтальный валок; 4 — рабочая часть валка; 5 — вертикальные валки.

Для создания четырехвалковых калибров в обычных клетях дуо или трио используется несколько конструкций кассет с неприводными вертикальными валками. В общем случае ширина корпуса кассеты для клетей дуо и трио станнинного типа не может превышать длину бочки горизонтального валка. Диаметр вертикальных валков зависит от длины бочки горизонтальных валков и ширины четырехвалкового калибра. В кассете обычно размещается вводная и выводная валковая арматура. Корпус кассеты устанавливается и крепится на проводковых брусьях рабочей клети. Применение кассет не требует больших капитальных затрат и реконструкции клетей стана.

Широко известно использование на крупносортных станах кассет конструкции Днепропетровского металлургического института, которые внедрены на заводе «Азовсталь», а также на Коммунарском и Енакиевском металлургических заводах при прокатке двутавровых балок и швеллеров [13; 20].

Кассета (рис. 48) представляет собой пространственную конструкцию, включающую две несущие плиты 5, соединенные между собой четырьмя продольными брусьями 6. В плитах прорезаны окна для прохождения «яблока» горизонтальных приводных валков и отверстия под эксцентриковые оси

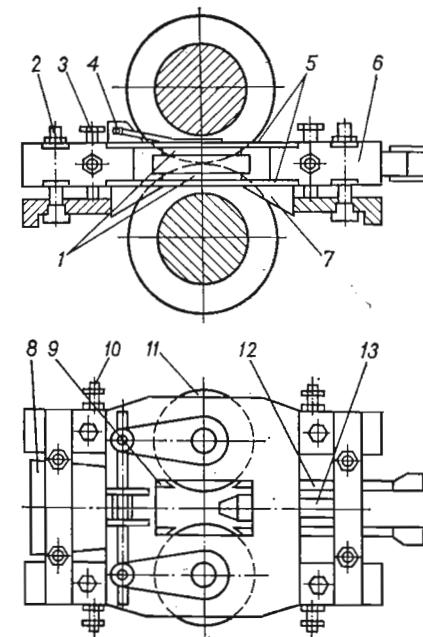


Рис. 48. Кассета конструкции ДМетИ.

вертикальных. Для изменения расстояния между неприводными вертикальными валками 11 служит эксцентриковое нажимное устройство 4, расположенное на верхней несущей плите. В кассете размещена вводная и выводная арматура. Вводная арматура представляет собой сварной раструб 8 с подвижными линейками 9, а выводная — коробку с линейками 12 и проводками 13. Кассета крепится в прокатной клети к арматурным брусьям шпильками 2 и распирается в станины боковыми распорными домкратами 10. По высоте кассета регулируется винтами 3. Фиксирование ее в направлении прокатки осуществляется косынками 7, которые приварены к нижней плите и упираются в арматурные брусья клети.

Вертикальные валки кассеты представляют собой кольцо, в которое запрессованы сферические роликовые подшипники. Для фиксации внешних обойм подшипников и предотвращения осевого смещения вертикальных валков служат крышки 1, которые крепятся с помощью шпилек. Смазка подшипников осуществляется через пазы, выполненные в плитах, и отверстия в эксцентриковых осях вертикальных валков.

Применение кассет с неприводными вертикальными валками позволяет без реконструкции станов внедрить в производство наиболее прогрессивную технологию прокатки двутавровых балок, швеллеров и других фланцевых профилей и повысить технико-экономические показатели производства.

Применение кассеты с неприводными вертикальными валками позволяет [13; 20] по сравнению с обычными балочными калибрами в 5—8 раз повысить стойкость валков, снизить на 25—40 % их расход, на 10—15 % уменьшить расход электроэнергии, максимально использовать минусовое поле допусков в течение всей кампании прокатки за счет раздельной регулировки зазора между горизонтальными и вертикальными валками, повысить производительность стана, улучшить качество поверхности и геометрию готового профиля.

В Днепродзержинском индустриальном институте разработан ряд конструкций кассет с общим корпусом на два вертикальных валка для клетей 300 станинного и бесстанинного

типов с длиной бочки рабочих валков от 200 до 600 мм, которые испытаны при прокатке мелкосортных сложных профилей. В связи с тем, что диаметр вертикальных валков зависит от длины бочки горизонтального валка и ширины четырехвалкового калибра, максимальный диаметр вертикальных вал-

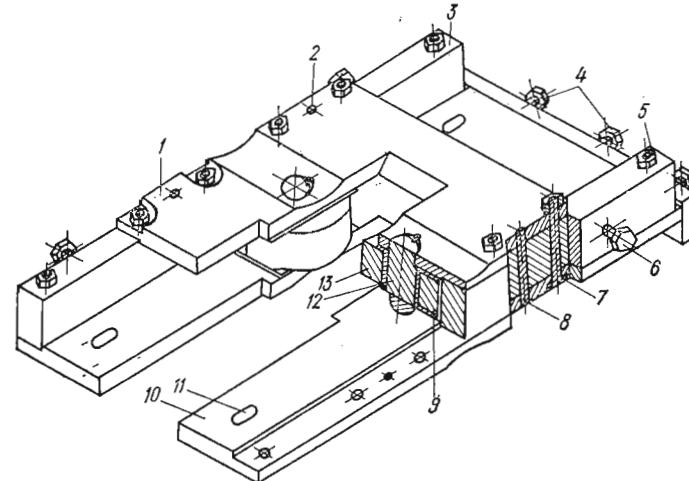


Рис. 49. Кассета с нерегулируемыми вертикальными валками.

ков составляет 80—130 мм. С целью сокращения времени простоев клети при замене кассеты благодаря сохранению настройки горизонтальных валков корпус кассеты выполнен сборным в виде П-образного элемента с осевым вырезом для захода горизонтальных валков [3].

Корпус кассеты с нерегулируемыми вертикальными валками (рис. 49) состоит из верхней 1 и нижней 10 плит с осевыми вырезами для захода горизонтальных валков, которые крепятся к боковым планкам 3 с помощью болтов 7 и гаек 5. Вертикальные валки 13 устанавливаются между плитами 1 и 10 при помощи осей 12 на подшипниках скольжения 9. Для

обеспечения соосности отверстий для осей валков в верхней и нижней плитах кассета имеет четыре сквозных отверстия 2 и конические штифты 8, которые забиваются перед установкой болтов 7.

Кассета устанавливается в клеть между горизонтальными валками на вводном и выводном проводковом брусьях. Поло-

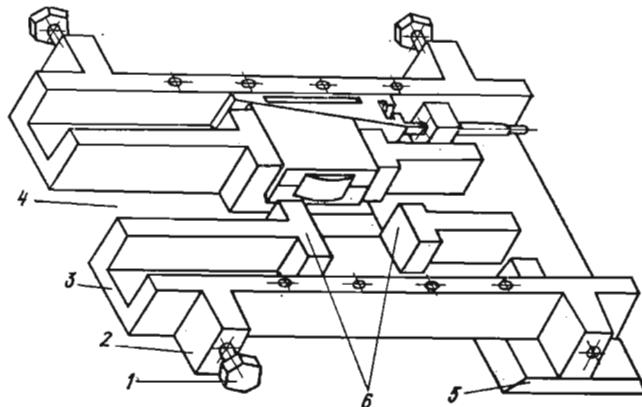


Рис. 50. Кассета с регулировкой зазора между вертикальными валками.

жение вертикальных валков относительно осей горизонтальных валков регулируется с помощью болтов 4, а по высоте — проводковыми брусьями. Относительно вертикальной оси калибра кассета устанавливается при помощи болтов 6, головки которых упираются в стойки станции. После требуемой установки вертикальных валков в калибре корпус кассеты крепится к брусьям клети посредством четырех болтов через овальные отверстия 11 в нижней плите корпуса кассеты.

Основными достоинствами этой кассеты являются простота в изготовлении и возможность установки между верхней и нижней плитами вводной и выводной валковой арматуры,

недостатком — отсутствие радиальной регулировки вертикальных валков, что не позволяет изменять зазор в процессе прокатки.

Кассета с регулировкой зазора между вертикальными валками состоит из следующих основных узлов: корпуса кассеты, двух подушек с вертикальными валками, клиновых механизмов регулировки зазора, крышки корпуса и двух съемных подкладок в форме «ласточкина хвоста».

Корпус кассеты (рис. 50) выполнен сварным или составным и представляет собой плоское основание 3 с массивными ребрами жесткости и направляющими 6 для подушки с вертикальным валком. На стороне выхода полосы из валков корпус имеет осевой вырез 4 для захода горизонтальных валков и установки выводной валковой арматуры.

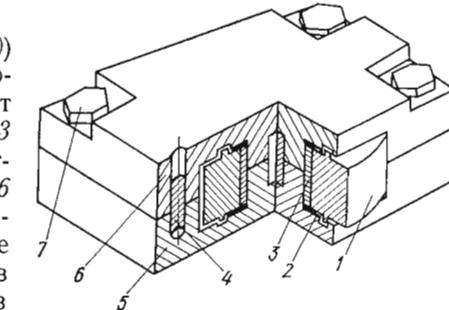


Рис. 51. Подушка вертикального валка.

На боковых плоскостях основания 3 имеются выступы 2 с резьбовыми отверстиями под распорные болты 1. С нижней стороны заднего конца корпуса сделан упорный выступ 5 в форме «ласточкина хвоста», который устанавливается на переднем проводковом брусе прокатной клети.

Корпус подушки (рис. 51) вертикального валка состоит из верхней 5 и нижней 6 частей, каждая из которых имеет кольцевую выемку и полуцапфу. С целью предотвращения смещения частей корпуса они фиксируются штифтами 4. При сборке подушки на нижнюю часть корпуса устанавливаются штифты, шайба 2, а на полуцапфу надевается вертикальный валок 1 с запрессованным в него подшипником 3 и шайба 2. Затем устанавливается верхняя часть корпуса и корпус подушки стягивается болтами 7.

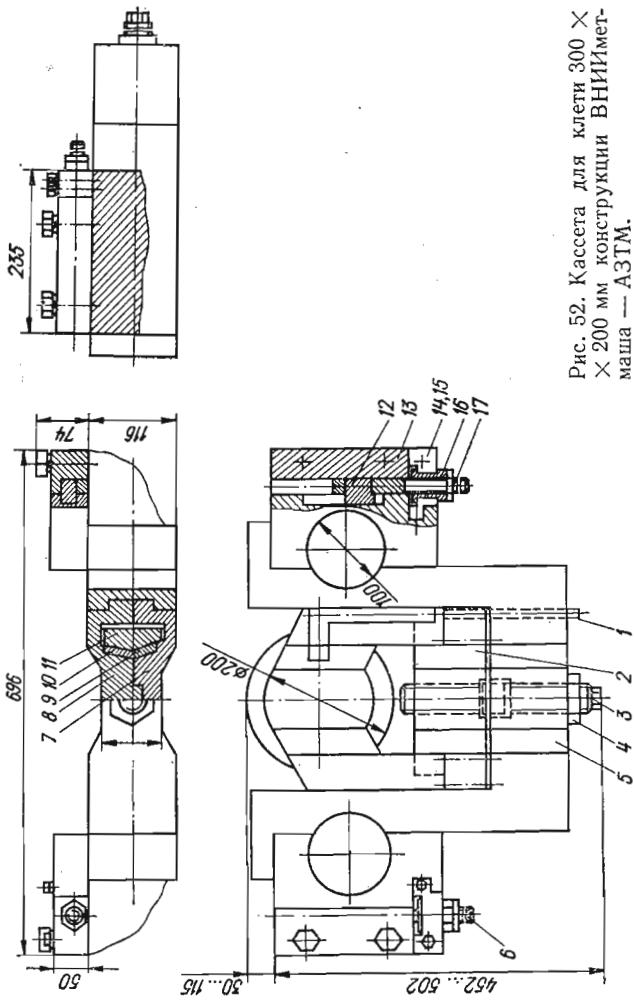


Рис. 52. Кассета для клети 300 ×
× 200 мм конструкции ВНИИмет-
маша — АЗТМ.

Зазор между вертикальными валками регулируется с помощью винта и одностороннего клина.

Для клети дуо с горизонтальными валками диаметром 300 мм и длиной бочки 200 мм конструкции ВНИИметмаша — АЗТМ разработана кассета с вертикальным валком диаметром 200 мм (рис. 52). Она состоит из корпуса 5, в котором на внутренних плоскостях выполнены направляющие пазы прямоугольной формы. Установка бандажа 11 валка осуществляется на двух разъемных полутраверсах 7 и 8, выполненных вместе как одно целое с полуосями. По бокам полутраверс предусмотрены выступы, которые при сборке входят в направляющие пазы корпуса 5. Посадка бандажа на полутраверсы выполняется на вкладышах 9 и 10 подшипника радиально-упорного типа. Подшипниковые вкладыши фиксируются на полутраверсах с помощью винтов. Для смазки вкладышей подшипника и бандажа вертикального валка применяется консистентная смазка, подаваемая в подшипник через маслопровод 1.

Полутраверсы 7 и 8 с целью увеличения жесткости конструкции и их совместного перемещения по направляющим пазам корпуса 5 соединяются поперечной траверсой 2 при помощи болтов. Перемещение в горизонтальной плоскости поперечной траверсы совместно с полутраверсами и бандажом осуществляется нажимным винтом 3, имеющим правую и левую резьбу. Регулировать вертикальный валок в направлении осей горизонтальных валков можно вплоть до почти полного сближения вертикальных валков, что позволяет прокатывать профили малого поперечного сечения с минимальными размерами отдельных элементов. После окончания регулировки фиксируют винт 3 с помощью контргайки 4.

Кассета вертикального валка в собранном виде устанавливается в пространство между подушками по стяжным болтам, которые определяют ее положение в горизонтальной плоскости. Для установки кассеты снимаются нажимное устройство и подушка верхнего горизонтального валка.

Для установки вертикальных валков в вертикальном направлении предусмотрен специальный механизм, позволяющий

осуществлять настройку без остановки стана. Корпус кассеты в вертикальном направлении перемещают при помощи подвижных сухарей 12, установленных в пазе тянувших планок 17 и 6 и выполненных как единое целое с винтом. Горизонтальное перемещение планки 17 (6) осуществляется гайкой 16, зафиксированной от осевого перемещения в корпусах 14 и 15 гайки. К нижней подушке корпуса крепятся болтами. Перемещение тянувших планок происходит в пазах между нижней подушкой и боковой направляющей 13. Скольжение сухарей 12 происходит в корпусе 5 по наклонному пазу, что и обеспечивает вертикальную регулировку вертикальных валков.

Основная нагрузка на вертикальные валки в радиальном направлении воспринимается и передается на подушку через фланцы корпуса кассеты.

Кассета была изготовлена и испытана на Череповецком стальпрокатном заводе при горячем калибровании фасонных профилей сложной формы (профиль направляющей для станкостроения, двутавровый профиль для автопогрузчиков и пр.). Испытания прошли удовлетворительно. Некоторым недостатком кассеты следует считать сложность ее изготовления.

Для сортовой предварительно напряженной клети бесстанинного типа с целью увеличения жесткости кассеты и упрощения ее конструкции разработана кассета [4], у которой корпус выполнен с двумя сквозными вырезами, перпендикулярными к оси прокатки и соответствующими диаметру стяжных болтов бесстанинной клети, при этом механизм установки кассеты выполнен в виде четырех установленных по два с боковых сторон кассеты регулировочных винтов с параболическими концами, выступающими в соответствующие сквозные вырезы корпуса. Преимущество данной кассеты для предварительно напряженной клети бесстанинного типа заключается в том, что нет подвижных сопрягаемых и крепежных деталей, а также отсутствует уравновешивающее устройство вертикального вала; обеспечивается достаточная жесткость кассеты, так как корпус выполнен монолитным.

КОНСТРУКЦИЯ СОСТАВНЫХ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

Так как для рассматриваемых конструкций четырехвалковых клетей кассета с общим корпусом для двух вертикальных валков устанавливается между горизонтальными валками, то рабочие бурты горизонтальных валков входят в прямоугольные вырезы (окна) корпуса и крышки кассеты.

Поэтому основным недостатком клетей с многовалковыми калибрами является возможность нарезки на валках только

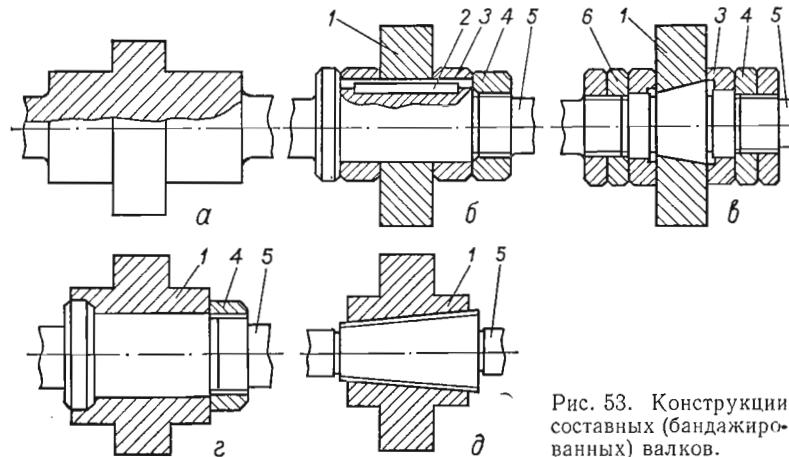


Рис. 53. Конструкции составных (бандажированных) валков.

одного калибра. Этот же недостаток имеет место и для других конструкций клетей с четырехвалковыми калибрами. Таким образом, при нарезке на валках только одного калибра оставшуюся часть длины бочки горизонтального вала приходится стачивать на меньший диаметр для обеспечения установки кассеты. Такая технология изготовления валков приводит к увеличению их расхода и затрат времени на перевалку.

На рис. 53, а схематически изображен горизонтальный прокатный валок, применяемый на двухвалковых клетях для образования четырехвалкового калибра с помощью кассеты

с вертикальными валками. Основное достоинство данной конструкции — незначительное осевое и радиальное биение рабочей поверхности калибра.

С целью уменьшения расхода валков в четырехвалковых клетях с кассетами наиболее целесообразно применять [21] составные (бандажированные) валки, оси которых могут использоваться многократно. При этом бандажи и оси, как правило, могут изготавливаться из заготовок меньших диаметров и размеров.

При использовании составной конструкции валка и в связи с этим малой массой бандажа возможно изготовление последнего из специальных и износостойких материалов. Особое значение имеет применение бандажей из твердосплавных сплавов, способствующее повышению контактной жесткости составных валков и получению проката с высокой точностью размеров.

В зависимости от условий прокатки и конструктивных особенностей прокатного стана возможны различные способы крепления бандажей на валках [21].

Составной бандажированный валок (рис. 52, б) состоит из рабочей оси 5, рабочего 1 и промежуточных 3 бандажей. Посадка рабочего и промежуточного бандажей осуществляется на призматической шпонке 2. К бурту оси бандажи прижимаются с помощью гайки 4. Конструкция составного валка проста в изготовлении. Однако в этом случае нельзя гарантировать отсутствие радиального биения и такие валки нежелательно применять в отделочных калибрах при производстве фасонных профилей повышенной и высокой точности.

Составной валок с конической посадочной поверхностью (рис. 53, в) состоит из оси 5, двух промежуточных 3 и рабочего 1 бандажей. Внутреннее отверстие рабочего бандажа выполнено коническим с уклоном, равным уклону на рабочей поверхности оси. Бандажи сжимаются при помощи гаек 4 и 6 с правой и левой резьбой соответственно. В случае ослабления натяга между посадочными поверхностями оси и бандажа последний гайками 6 перемещают в направлении гайки 4,

выбиная, таким образом, образовавшийся зазор между посадочными поверхностями бандажа и оси.

Составной прокатный валок с коническими посадочными поверхностями целесообразно применять для отделочных калибров при прокатке фасонных профилей высокой точности, так как для такой конструкции можно всегда устранить ослабление натяга между посадочными поверхностями бандажа и оси за счет осевого перемещения рабочего бандажа. К недостаткам конструкции составного валка с коническими посадочными поверхностями следует отнести большую сложность в изготовлении и эксплуатации. Надежная передача крутящего момента и осевая фиксация могут быть осуществлены с помощью эксцентрика, который выполняется как по всей длине оси валка при перекосе ее относительно оси вращения, так и частично на некотором участке бочки валка.

На рис. 53, г приведена конструкция составного валка с креплением бандажа 1 с помощью эксцентрично расположенного бурта, выполненного как единое целое с осью 5. Бандаж от осевого смещения крепится гайкой 4. Такая конструкция валка позволяет быстро собирать и разбирать валок. Однако она трудоемка в изготовлении, так как необходима точная подгонка эксцентрикита оси и бандажа.

Составной валок с конической резьбовой посадочной поверхностью (рис. 53, д) состоит из опорной (несущей) оси 5, на которой навинчен по конической резьбе бандаж 1. На торце бандажа имеются отверстия под ключ для сборки и разборки валка. В процессе работы валка под действием крутящего момента прокатки бандаж навинчивается на ось и равномерно притягивается по всей сопрягаемой поверхности. При возникновении зазора, например при тепловом расширении бандажа, он автоматически выбирается за счет навинчивания бандажа на ось. При использовании составного валка с резьбовой конической посадочной поверхностью для прокатки фасонных профилей необходима периодическая настройка валков, компенсирующая их осевое смещение.

Опыт использования составных валков с учетом их преимуществ и недостатков позволяет сделать вывод, что бандажированные валки с цилиндрической осью следует применять при горячей прокатке фасонных профилей в четырехвалковых калибрах. При холодной прокатке фасонных профилей наиболее целесообразно использовать составные валки с коническими посадочными поверхностями.

ВАЛКОВАЯ АРМАТУРА

Одним из достоинств четырехвалковых калибров является отсутствие ручьев с глубокими врезами в валки, а также равенство катающих диаметров в каждой паре валков. В этом случае основным назначением валковой арматуры является направление прокатываемой полосы в калибр и вывод ее из него, что позволяет использовать для этой цели сравнительно простые конструкции вводной и выводной арматуры.

Однако конструкции четырехвалковых клетей существенно отличаются от сортовых двухвалковых или трехвалковых клетей. Малая длина бочки горизонтальных валков (до 150 мм) приводит к соответствующему уменьшению ширины проема между станинами, а необходимость размещения корпусов подушек вертикальных валков — к резкому увеличению ширины станин четырехвалковых клетей. В результате доступ к очагу деформации значительно усложняется по сравнению с сортовыми двухвалковыми или трехвалковыми клетями.

В настоящее время четырехвалковые клети широко используются только на универсальных балочных станах, для которых накоплен большой опыт конструирования валковой арматуры применительно к прокатке двутавровых балок. Общим направлением при конструировании валковой арматуры для универсальных балочных клетей является стремление к унификации арматуры и сокращению затрат времени на ее замену и настройку.

Обычно на горизонтальные и вертикальные валки балочных клетей ставят раздельную арматуру. При этом проводки верти-

кальных валков часто устанавливают непосредственно на корпусе подушки вертикального валка (рис. 54, а).

Сточки зрения унификации представляет интерес конструкция валковой арматуры вертикальных валков, изображенная на рис. 54, б.

Вводные и выводные проводки состоят из двух шарнирно соединенных частей. Проводки 4 жестко закреплены на подушке 2 вертикального валка 3. При этом рабочий носок проводки 4 прилегает к бочке валка 3, а задний конец шарнирно соединен с подвижной направляющей проводкой 5, другой конец которой соединен с корпусом 6 посредством винтового регулировочного устройства 1. Унификация конструкции достигается возможностью использования одних проводок для прокатки балок различных размеров.

Для устойчивости валковой арматуры горизонтальных валков применяются опорные подвесные брусья рамного типа, закрепляемые в приливах на торцевой поверхности станин клети с помощью клиньев. Валковая арматура устанавливается внутри проема станин за рамой бруса (рис. 54, в).

Более удобной считается установка вводных и выводных проводок на горизонтальные валки, смонтированных предва-

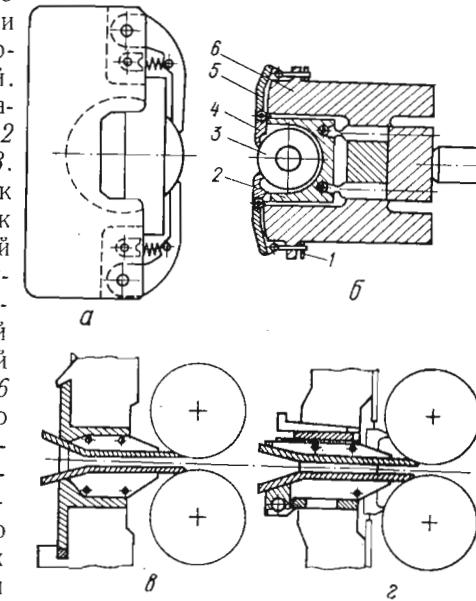


Рис. 54. Валковая арматура вертикальных (а, б) и горизонтальных (в, г) валков четырехвалковых балочных клетей.

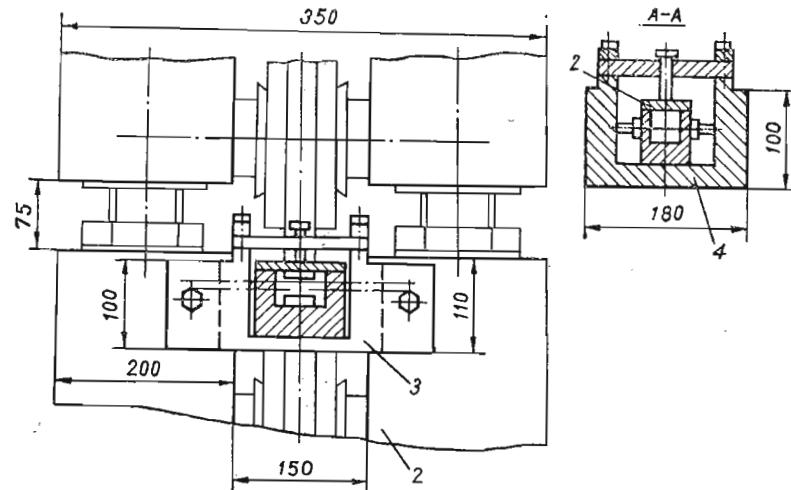
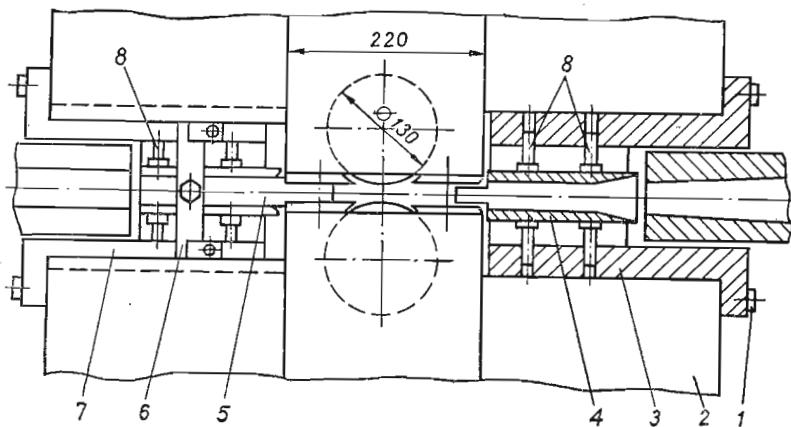
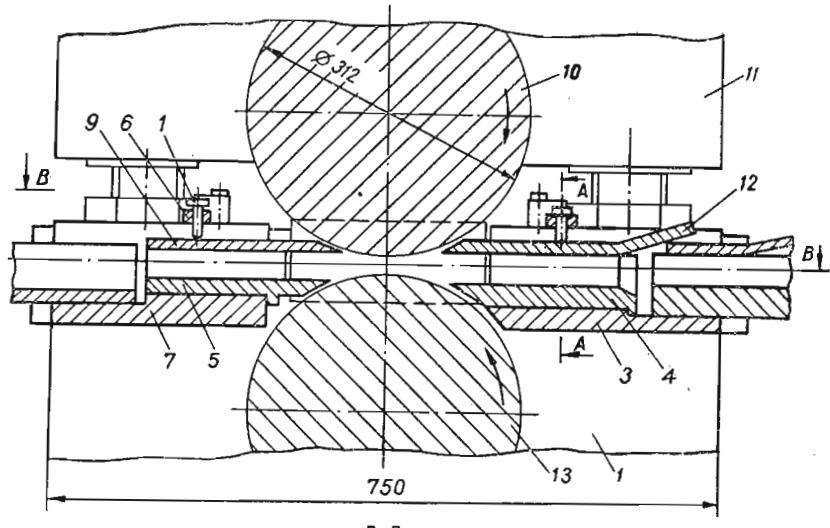


Рис. 55. Валковая арматура четырехвалковой клети 300 конструкции Днепродзержинского индустриального института.

рительно в корпусе специальной кассеты, закрепляемой затем с помощью клиньев в приливах на внутренней боковой поверхности станин (рис. 54, г). Применение кассет позволяет ускорить замену арматуры при сборке клетей на стенде или в процессе прокатки.

В широко известных конструкциях валковой арматуры универсальных клетей из-за узкого проема между станинами доступ к установленным проводкам весьма затруднен. Поэтому устройства для регулировки положения проводок отсутствуют. Точная подстройка арматуры в процессе прокатки невозможна. Настраивают устанавливаемую арматуру в процессе сборки клети на стенде.

Следует также отметить, что при прокатке балок в универсальных четырехвалковых клетях на рабочих валках отсутствуют какие-либо фасонные ручьи, что значительно упрощает конструкцию валковой арматуры балочных клетей.

Для мелкосортной четырехвалковой клети конструкции Днепродзержинского индустриального института разработана и испытана конструкция валковой арматуры, позволяющая настраивать и регулировать арматуру в процессе прокатки (рис. 55).

На горизонтальные и вертикальные валки предусмотрена раздельная арматура. Валковая арматура вертикальных валков представляет собой сменные (в зависимости от размеров и конфигурации профиля) пропуски 4 и проводки 5, закрепляемые непосредственно на корпусе 11 кассеты (см. рис. 42).

Вводная и выводная арматура горизонтальных валков крепится в массивных коробках 3 и 7, выполняющих одновременно функцию опорных брусьев.

Коробка 3 открытого типа жестко устанавливается в специальных пазах, выполненных на внутренней боковой поверхности подушек нижнего блока 2 клети. Корпус коробки имеет лапы с отверстиями, и после установки коробки в паз она закрепляется к торцевой поверхности болтами 1. Такое крепление позволяет регулировать положение коробки вдоль оси прокатки. На боковых стенках корпуса выполнены резьбовые отверстия, в которые изнутри коробки вставляются болты 8, с помощью которых регулируется положение пропуска 4 (проводки 5) поперек оси прокатки и его закрепление.

Валковая арматура горизонтальных валков 10 и 13, кроме коробок 3 и 7, включает нижние пропуски 4 и проводки 5 П-образного сечения, а также плоские верхние пропуски 12 и проводки 9. На каждый профиль в соответствии с его размерами и конфигурацией предусматриваются свои пропуски и проводки. Для предотвращения смещения нижнего пропуска 4 или проводки 5 вдоль оси прокатки на нижней его грани выполнен выступ, а дно коробки имеет соответственный уступ. В собранном виде пропуски и проводки прижимаются ко дну коробки с помощью болта 1 и поперечной планки 6.

Так как в разработанной конструкции валковой арматуры открытая часть коробки имеет ширину 140 мм, а максимальная

ширина нижнего пропуска не превышает 70 мм, то ко всем регулировочным болтам имеется свободный доступ.

Возможности перемещения коробки вдоль оси прокатки, а пропусков—поперек позволяют настраивать и регулировать валковую арматуру непосредственно в процессе прокатки, что весьма важно при освоении новых сложных профилей.

ГЛАВА



ПРОКАТКА И КАЛИБРОВКА ФАСОННЫХ ПРОФИЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧЕТЫРЕХВАЛКОВЫХ КАЛИБРОВ

ПРОФИЛЬ ДЛЯ ШИНЫ ТАБУЛЯТОРА ПИШУЩИХ МАШИН

Фасонный профиль для шины табулятора (рис. 56) имеет в поперечном сечении асимметричную двутавровую форму с треугольными пазами на внешних поверхностях полок и относится к четвертой группе сложности. Профиль изготавливается из стали 15 по ГОСТ 1050—74 и поставляется в нагартованном состоянии в прутках длиной до 3 м и кратной 351 и 481 мм. Кривизна полос должна быть не более 1 мм, а скручивание вокруг продольной оси не должно превышать 1° на 1 м длины. Поверхность профиля должна соответствовать 4-му классу точности группы «В» по ГОСТ 1051—73.

Фасонный профиль для шины табулятора может быть изготовлен по следующим технологическим схемам:

1. Горячая прокатка фасонных подкатов в двухвалковых калибрах без продольных пазов на внешней стороне полок с последующим волочением за 3—4 прохода. Основным недо-

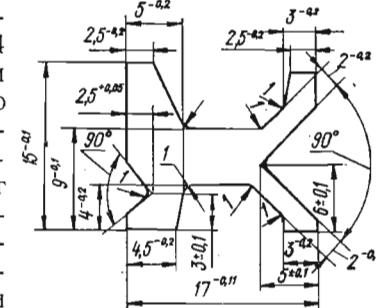


Рис. 56. Фасонный профиль для шины табулятора.

стаком схемы является невозможность получения треугольных пазов на боковых гранях полок в двухвалковых калибрах и, как следствие этого, увеличение количества проходов при волочении. Кроме того, возникают трудности при изготовлении фильтер высокой точности и остриении передних концов подкатов.

2. Горячая прокатка фасонных подкатов повышенной точности с продольными пазами в четырехвалковых калибрах

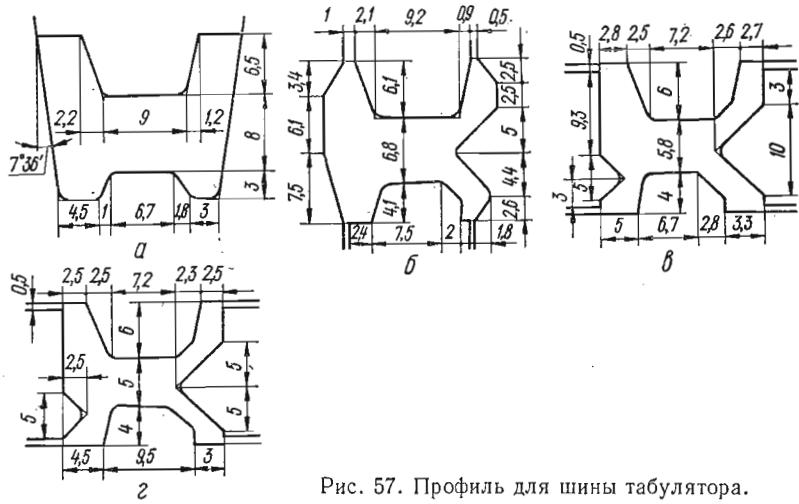


Рис. 57. Профиль для шины табулятора.

и волочение подкатов за один проход. Применение схемы позволяет сократить количество проходов при волочении, но не устраняет основных недостатков первой схемы.

3. Горячая прокатка фасонных подкатов повышенной точности с продольными пазами в четырехвалковых калибрах с последующей холодной прокаткой фасонного подката в четырехвалковых калибрах. Схема по сравнению с предыдущими имеет существенные преимущества, поскольку отпадает необходимость в трудоемких операциях изготовления фасон-

ных фильтер и в остриении передних концов полос. При этом повышается производительность и уменьшается расход металла. К недостаткам схемы можно отнести меньшую точность и возможные незаполнения профиля в разъемах калибра.

Для производства профиля для шины табулятора была принята третья технологическая схема. В качестве исходной заготовки было предусмотрено использовать круглое сечение, которое можно предварительно прокалибровать с целью стабилизации процесса прокатки.

При разработке и освоении технологии прокатки профиля для шины табулятора горячекатаный фасонный подкат предусмотрено прокатывать из заготовки круглого сечения за три прохода, два из которых осуществляются в четырехвалковых калибрах (рис. 57). Применение двух четырехвалковых калибров объясняется необходимостью получения подката повышенной точности и уменьшения износа чистового калибра.

При горячей прокатке максимальное формоизменение металла происходит в первом (рис. 57, а) и втором (рис. 57, б) калибрах. В первом закрытом калибре заготовка круглого сечения деформируется в асимметричный двутавровый фасонный профиль, а во втором образуется треугольный паз на правой полке. В третьем калибре (рис. 57, в) осуществляется дальнейшее формирование полос и стенки профиля. Конфигурация чистового калибра (рис. 57, г) аналогична форме готового профиля. Последовательность формоизменения металла (1—4) по проходам при горячей прокатке подката спецпрофиля для шины табулятора представлена на рис. 58.

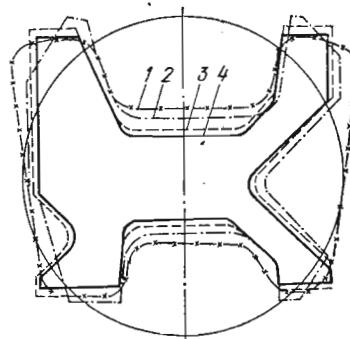


Рис. 58. Формоизменение металла по проходам при прокатке профиля для шины табулятора.

6. Данные опытно-промышленной прокатки спецпрофиля «шина табулятора»

Номер калибра	Диаметр заготовки, мм	Коэффициент высотной деформации	Высота профиля, мм		Ширина полок, мм		Ширина профилей, мм
			слева	справа	верхних	нижних	
1	18,0	2,25	16,3	15,2	4,9—5	3,2—3,4	20,7
2	18,0	1,14—1,25	15,9—16,8	15,4—15,7	4,5—6,0	3,8—4,5	18—18,2
1	18,5	2,2—2,64	14,2—16,3	13,6—15,7	3—5,4	2,3—3,4	20—20,8
2	18,5	1,03—1,76	14,5—17,2	14,5—16,8	3,7—6,7	3—5	17,9—20
3	1,08—1,228	14,8—15,7	14,8—15,5	5,0—6,0	3,8—4,5	17,5—18,4	
1	2,34—2,5	14,5—16,3	14,3—15,2	4,4—5,8	2,5—3,4	20—20,8	
2	19,0	1,04—1,29	15,4—17	14,6—18	4,6—6,8	2,4—4,8	18—18,8
3	1,04—1,4	14,8—16,3	13,9—16,2	4,4—6,4	3,4—4,2	17,3—18,1	
1	2,24	14,9—16,3	15,0—16,3	5,0—6,0	2,5—3,1	20,5	
2	19,5	1,07—1,33	15,5—17,4	15,6—16,7	6,0—7,3	2,6—3,6	18,5
3	1,25	15,5—15,8	15,8—15,9	6,0—6,2	3,4—4,0	17,4—17,5	
1	2,41—2,63	15,7—17	15,7—16,5	4,6—6,9	2,3—3,1	20,5—21	
2	1,03—1,14	16,3—18,6	16,5—17,9	5,3—7,5	3,0—4,0	18,2—18,8	
3	1,31—1,33	15,5—15,8	15,3—16,0	5,8—6,4	3,3—4,0	17,5	

Общий коэффициент вытяжки за три прохода при прокатке из заготовки диаметром 19 мм равен 1,859, а средний коэффициент за один проход — 1,230.

Разработанная калибровка испытана на полупромышлennом двухклетевом стане 300. Температура начала прокатки составляет 1140—1180, конца — 850—900 °С.

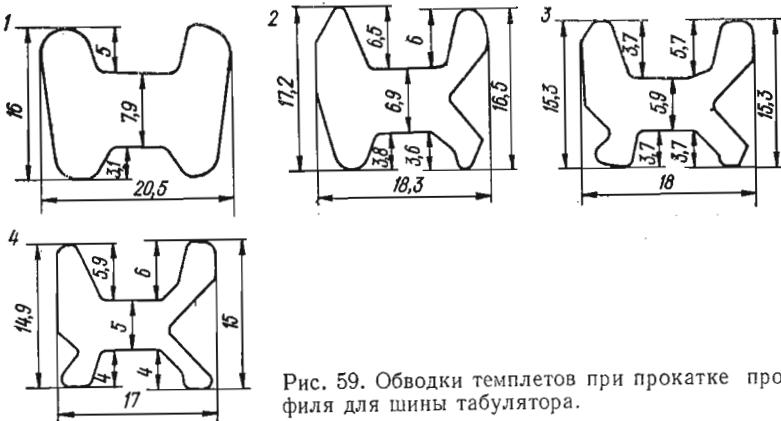


Рис. 59. Обводки темплетов при прокатке профиля для шины табулятора.

Четырехвалковые калибры образовывались установкой на клетях дюо кассет с неприводными вертикальными валками диаметром 70 мм.

Для исследования заполнения калибров при прокатке применялись заготовки диаметром от 18 до 20 мм.

Из анализа данных по замерам раскатов после каждого прохода (табл. 6) можно сделать вывод, что наиболее полно калибры заполняются при обжатии заготовок диаметром 19,5—20,0 мм. Однако при этом в первом четырехвалковом калибре образуются заусенцы. Поэтому для производства опытной партии спецпрофилей «шина табулятора» принята исходная заготовка диаметром 19 мм.

Чистовой проход при холодной прокатке (см. рис. 57) проводился в четырехвалковом калибре с диаметром горизонталь-

ных валков 300 и вертикальных — 70 мм. Перед прокаткой горячекатаные подкаты подвергались травлению в растворе серной кислоты, промывке в воде и нейтрализации в содовом растворе. Коэффициенты обжатия при холодной прокатке приняты незначительные, но достаточные для обеспечения требуемого качества поверхности и точности размеров профиля. Коэффициент вытяжки при холодной прокатке равен 1,16.

На рис. 59 изображены обводки темплетов по проходам (1—4). Спецпрофиль испытывался на Кировоградском заводе пишущих машин.

Данные измерений и наружный осмотр готовых спецпрофилей, прокатанных по разработанной технологии, подтверждают соответствие их техническим условиям.

ПРОФИЛЬ ДЛЯ ТРИКОТАЖНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Фасонный профиль (рис. 60, а) для трикотажного машиностроения представляет собой сложный симметричный профиль двутавровой формы, изготавливается из стали 50 по ГОСТ 1050—74 и поставляется в нагартованном состоянии. Поверхность профиля должна соответствовать 4-му классу точности группы В по ГОСТ 1051—73.

В настоящее время на Омутнинском металлургическом заводе готовый профиль для трикотажного машиностроения

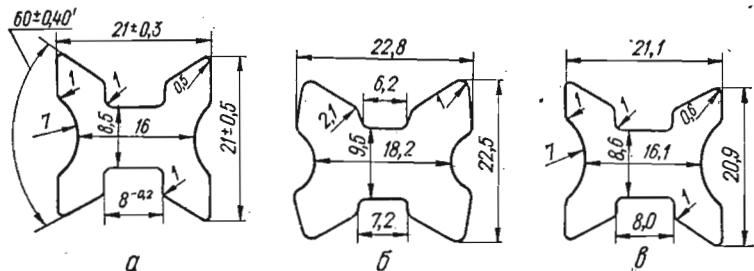


Рис. 60. Готовый профиль (а, в) и горячекатаный подкат (б) для трикотажного машиностроения.

изготавливают волочением за два пропуска из фасонного подката (рис. 60, б), получаемого горячей прокаткой за пять фасонных проходов в двухвалковых калибрах, которые не позволяют контролировать размеры боковых продольных пазов. Поэтому действующая калибровка не обеспечивает получение фасонного подката, близкого к готовому профилю, что усложняет процесс волочения и снижает точность размеров готового профиля.

Анализ конфигурации профиля и существующей калибровки показал, что точность горячекатаного профиля можно повысить путем применения четырехвалковых калибров.

Для получения горячекатаного фасонного профиля повышенной точности (рис. 60, а) разработаны и испытаны три варианта калибровок с использованием четырехвалковых калибров (рис. 61), которые нарезали в бесстанинной четырехвалковой клети конструкции Днепродзержинского индустриального института.

Первый вариант калибровки предусматривает горячую прокатку профиля в двух фасонных четырехвалковых калиб-

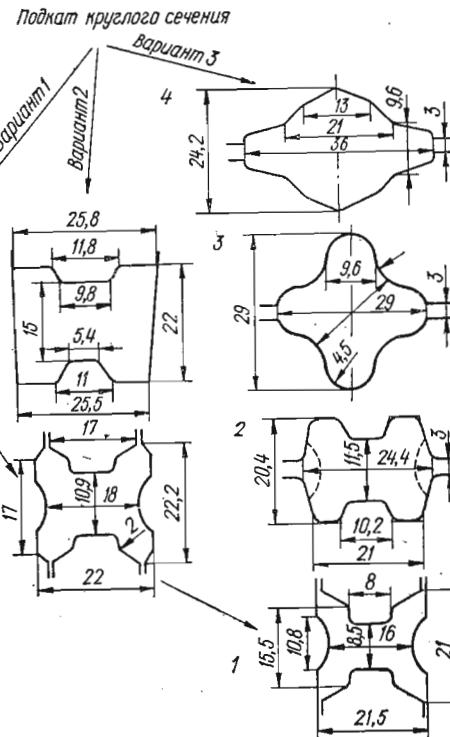


Рис. 61. Калибровка профиля для трикотажного машиностроения.

рах из круглого подката диаметром 23 мм. При испытании калибровки профиль получен в соответствии с чертежом (рис. 60, *в*), но при прокатке наблюдалось несимметричное заполнение фланцев в первом фасонном калибре, которое полностью не устранилось в чистовом калибре.

По второму варианту калибровки профиль прокатывается из круглого подката диаметром 27 мм в трех фасонных калибрах. В первом закрытом калибре балочного типа формируется из круглого подката черновой двутавровый профиль, который задается в предчистовой четырехвалковый калибр. Испытание калибровки показало, что она гарантирует получение необходимого профиля, но из-за малого уклона боковых стенок разрезного калибра в нем происходит значительное заклинивание металла, что приводит к интенсивному износу проводок и их поломке.

Третий вариант калибровки профиля предусматривает горячую прокатку из круглого подката в четырех фасонных калибрах (*1—4*), последний из которых четырехвалковый. Особенностью калибровки является наличие специального крестообразного калибра, в котором осуществляется формирование фланцев профиля с одинаковыми размерами, а также отсутствие закрытых калибров. При испытании калибровки применялись подкаты диаметром 29—32 мм. Нормальное заполнение крестообразного калибра в соответствии с расчетом осуществляется в случае применения подкатов диаметром 30 мм. Общий коэффициент вытяжки при прокатке за четыре прохода составляет 2,7, а коэффициенты вытяжки в калибрах по ходу прокатки — 1,4; 1,2; 1,15 и 1,15.

Усовершенствованная калибровка с использованием четырехвалкового калибра позволяет контролировать размеры горячекатаного профиля по всему периметру, максимально приблизить его форму сечения к готовому профилю, сократить число фасонных калибров при прокатке и число пропусков при волочении.

ФАСОННЫЙ П-ОБРАЗНЫЙ ПРОФИЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Асимметричный П-образный профиль с размерами 28 × 23 мм (рис. 62, *а*) с параллельными наружными гранями полок имеет с нижней стороны стенки уклон 8° и изготавливается из стали 40Х на металлургическом заводе ПО «Ижсталь».

Исходной заготовки круглого сечения за пять проходов

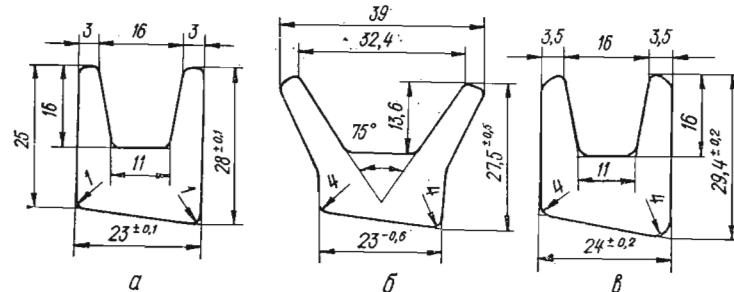


Рис. 62. Фасонный П-образный готовый профиль (*а*) и горячекатанные подкаты (*б*, *в*).

горячей прокаткой получают фасонный подкат обычной точности ($\pm 0,5$ мм) с отогнутыми фланцами (рис. 62, *б*). Последующая холодная прокатка проводится за четыре прохода, чистовой проход осуществляется в четырехвалковом калибре.

Из анализа действующей технологии производства профиля следует, что для сокращения затрат и повышения эффективности требуется уменьшить количество проходов при холодной деформации.

Предложенная новая технология предусматривает прокатку горячекатаного подката повышенной точности ($\pm 0,2$ мм), с параллельными наружными гранями полок (рис. 62, *в*), из которого за один проход в четырехвалковом калибре стана холодной прокатки получается готовый профиль.

При горячей прокатке П-образный подкат с параллельными фланцами получают по разработанной калибровке за пять проходов (рис. 63), последний из которых осуществляется в четырехвалковом калибре.

В первом калибре из квадратной заготовки 33×33 мм формируется раскат клиновидной формы. Во втором и третьем

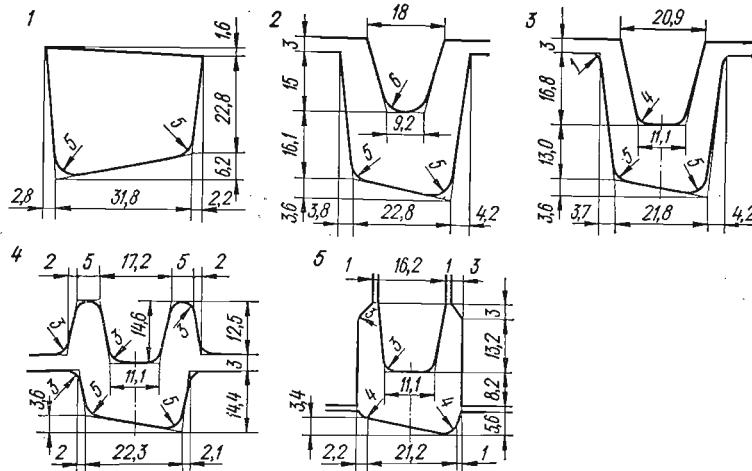


Рис. 63. Калибровка горячекатаного подката П-образного профиля.

разрезных калибрах швеллерного типа осуществляется основная деформация металла. Контроль высоты фланцев проводится в четвертом калибре. В чистовом четырехвалковом калибре выполняется подгибка фланцев и их окончательное утонение. Расчетные величины коэффициентов вытяжки по ходу прокатки соответственно составляют: 1,15; 1,35; 1,25; 1,06; 1,15, а суммарный коэффициент вытяжки — 2,4.

Особенностью чистового четырехвалкового калибра при горячей прокатке является возможность деформации углов, в районе которых планируются разъемы в чистовом четырехвалковом калибре стана холодной прокатки.

Испытание разработанной калибровки проведено на двухклетевом полупромушленном стане 300. В чистовом калибре устанавливалась кассета конструкции Днепродзержинского индустриального института с двумя вертикальными неприводными валками, имеющими возможность радиальной регулировки.

При опытной прокатке получен горячекатанный фасонный подкат повышенной точности. Из проведенных исследований следует, что в четырехвалковом калибре из-за асимметричности профиля относительно горизонтальной оси формоизменение металла по полкам и по стенке профиля различно. Установлено также, что для качественного заполнения полок и участков раската в зонах нижних разъемов необходимы определенные толщины полок и стенки раската, поступающего из контрольного калибра. Определены приемы настройки необходимого заполнения в разъемах четырехвалкового калибра за счет перераспределения режимов обжатий в черновых проходах (см. рис. 63).

Применение четырехвалкового калибра при горячей прокатке позволило получать подкат с параллельными наружными гранями полок и с допусками на основные размеры $\pm 0,2$ мм, что уменьшает число проходов при холодной прокатке с четырех до одного. Следует отметить, что прокатка в четырехвалковых калибрах П-образного профиля, имеющего закругления наружных углов (см. рис. 62, б), усложняется из-за расположения нижних разъемов калибра выше углов профиля (рис. 63). Это обуславливает необходимость формирования в черновых калибрах строго определенных толщин стенки и полок раската.

КОРЫТНЫЙ ПРОФИЛЬ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Низкорытный профиль $46 \times 11 \times 6,5$ мм (рис. 64, а) изготавливается из стали 40ХН2МА, имеет параллельные грани полок и радиусы скругления углов менее 1 мм, а также незначительное поле допусков на основные размеры ($0,17$ — $0,5$ мм).

Указанные требования обусловили трудоемкую технологию его производства. Вначале на стане горячей прокатки получают фасонный подкат обычной точности ($\pm 0,5$ мм) с уклоном граней полок (рис. 64, б), который затем доводится волочением за четыре прохода до необходимой точности размеров и формы.

Из анализа действующей технологии производства данного профиля следует, что сокращение количества проходов при

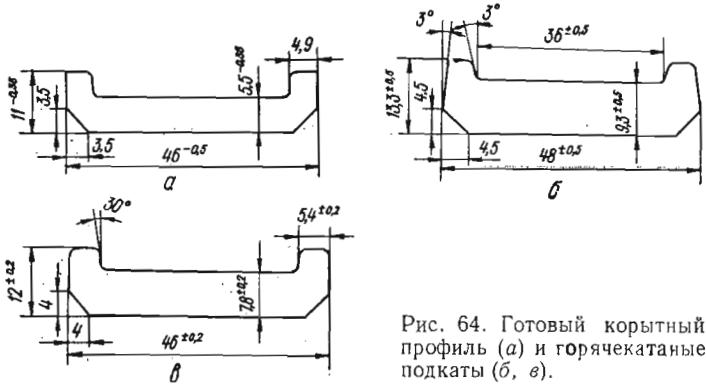


Рис. 64. Готовый корытный профиль (а) и горячекатаные подкаты (б, в).

волочении возможно при условии получения горячекатаного фасонного подката с параллельными гранями полок и уменьшением поля допусков в два раза (рис. 64, в).

Для получения фасонного подката повышенной точности испытаны два варианта калибровок, особенностью которых является прокатка полок с параллельными гранями за счет применения четырехвалкового калибра, создаваемого в обычной клети дуо с помощью кассет с неприводными вертикальными валками.

Первый вариант калибровки (рис. 65, а) разработан и испытан на полупромышленном стане 300.

При проектировании калибровки с целью качественного формирования фасок чистовой калибр принят закрытым с

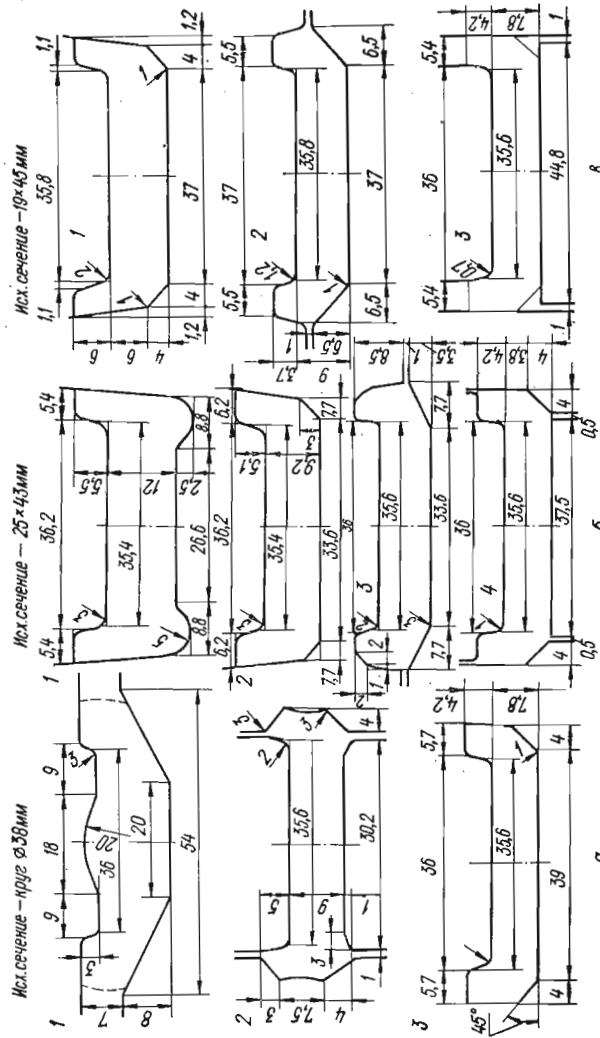


Рис. 65. Калибровка корытного профиля повышенной точности.

уклоном боковых стенок 2 %. Для надежного формирования полосы, задаваемой в чистовой калибр, в качестве предчистового принят четырехвалковый калибр, в котором на боковых гранях раската формируется вогнутость 0,2 мм. В первом фасонном калибре формируются на краях полосы сверху утолщения, а снизу фаски. Конструкция первого калибра позволяет применять исходные подкаты круглого, прямоугольного или овального сечений соответствующих размеров. С целью симметричного заполнения первого калибра при использовании круглых или овальных подкатов верхний ручей имеет посередине углубление. Расчетные вытяжки по ходу прокатки составляют 1,85; 1,65 и 1,12.

При испытании калибровки получен профиль из круглого подката диаметром 38 мм в соответствии с чертежом.

Анализ прокатки показал, что применение четырехвалковового калибра в предчистовом проходе позволяет использовать чистовой закрытый калибр с уклоном боковых стенок 1—2 %, в котором качественно формируются все элементы профиля. Недостатком данной калибровки является быстрый износ вертикальных валков в четырехвалковом калибре из-за больших запланированных обжатий.

Второй вариант калибровки (рис. 65, б) разработан и испытан на промышленном стане 300. Калибровка предусматривает четыре фасонных калибра, из них первые два — закрытые, третий — полузакрытый и в основном предназначен для контроля ширины полок, окончательное формирование профиля осуществляется в четырехвалковом калибре. В чистовом калибре предусмотрены незначительные обжатия вертикальными валками, что обеспечивает стойкость чистового калибра для прокатки требуемой партии профиля.

При испытании калибровки наблюдалось переполнение нижних разъемов чистового четырехвалкового калибра и недостаточное заполнение полок, которые невозможно было устранить настройкой калибровки, что свидетельствует о сложности обеспечения необходимого заполнения четырехвалкового калибра корытной формы с нижними разъемами калибра

в зоне фасок профиля. В целом прокатка показала, что применение четырехвалкового калибра в чистовом проходе позволяет прокатывать низкокорытный профиль с параллельными гранями полок и обеспечивает высокую точность габаритных размеров профиля.

На основании анализа результатов испытания двух вариантов калибровок разработана калибровка горячекатаного фасонного подката повышенной точности (рис. 65, в), которая предусматривает получение профиля за три фасонных прохода. В первом разрезном калибре из полосы прямоугольного сечения получают черновой корытный профиль, во втором калибре утоняется стенка с окончательным формированием фасок, а также контролируется ширина полок. В чистовом четырехвалковом калибре раскат обжимается по стенке и боковым граням, при этом торцы полок и фаски не обжимаются, и так как обжатия незначительны (1—1,5 мм), то конфигурация фаски, приданная в предчистовом калибре, практически не изменяется.

Применение четырехвалкового калибра при прокатке низкокорытного профиля позволяет за три-четыре прохода получать профиль повышенной точности с параллельными гранями полок, что сокращает в два раза число проходов при последующем волочении и обеспечивает снижение себестоимости изготовления профиля на 20 %.

Установлено, что в четырехвалковом корытообразном калибре уширение металла в направлении верхних и нижних разъемов различно, что вызывает затруднения в формировании необходимых фасок и достаточно острых углов полок профиля. Поэтому при прокатке корытных профилей повышенной точности в качестве чистового калибра можно использовать четырехвалковый, но при этом окончательное формирование фасок профиля выполнять в предчистовом калибре, или применять в чистовом проходе закрытый двухвалковый калибр с малыми выпусками, а в предчистовом — четырехвалковый калибр.

ПРОФИЛЬ ДЛЯ РАМ ФИЛЬТРОВ

Фасонный профиль для рам фильтров имеет асимметричное сечение с двумя продольными пазами. Особенностями профиля являются различие конфигураций и размеров полок, а также наличие криволинейной боковой поверхности (рис. 66, а). Профиль предназначен для изготовления рам фильтрующих

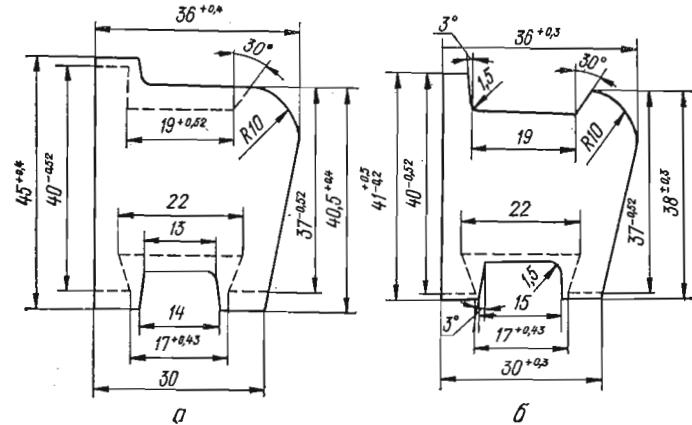


Рис. 66. Профиль для рам фильтров:
а — обычный; б — облегченный

элементов и производится из нержавеющей стали 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632—72. Особым требованием ТУ на данный профиль является точное выполнение заданной кривизны левой боковой поверхности.

Сложность профиля и высокие требования к точности формы и размеров готового изделия обусловили следующую технологию изготовления: получение фасонного катаного профиля за шесть фасонных проходов горячей и три прохода холодной прокатки; фрезерование на катаном профиле продольных пазов, а также фланцевых элементов.

К основным недостаткам действующей технологии следует отнести незначительную точность формы и размеров ката-

ного профиля, которая требует применения последующей механической обработки для получения необходимой точности, что приводит к дополнительному расходу металла и увеличению трудозатрат.

Анализ конфигурации профиля и существующей технологии получения катаного профиля на стане 630/430 Ленин-

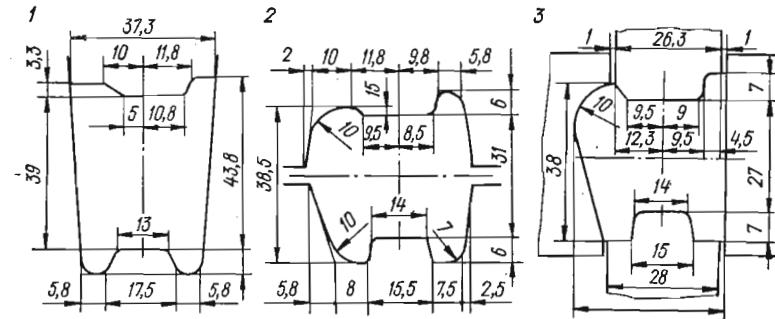


Рис. 67. Калибровка профиля для рам фильтров.

градского завода турбинных лопаток показал, что точность формы катаного профиля можно повысить при условии применения четырехвалкового калибра.

Для прокатки облегченного профиля повышенной точности для рам фильтров (см. рис. 66, б) разработана калибровка (рис. 67), предусматривающая горячую прокатку профиля в трех фасонных калибрах (1—3) из подката прямоугольного сечения. Для достижения необходимой формы катаного профиля чистовой проход выполняется в четырехвалковом калибре, который позволяет получить одновременно заданную кривизну боковой поверхности и продольные пазы на профиле, а также резко сократить число фасонных калибров.

Калибровка проектировалась против хода прокатки. Так как к боковым поверхностям профиля предъявляются жесткие требования, то разъемы чистового калибра располагаются в местах радиусов скругления углов фланцев профиля, имею-

ющих свободный допуск. Форма и размеры предчистового калибра рассчитаны исходя из принципа равномерных деформаций по ширине полосы в чистовом четырехвалковом калибре. Для уменьшения усилия на вертикальные валки, а также обеспечения надежного захвата в четырехвалковом калибре обжатие неприводными вертикальными валками принято меньшим ($1/\eta_v = 1,05$) по сравнению с обжатием приводными горизонтальными валками ($1/\eta_r = 1,15$). После анализа рассчитанной конфигурации сечения предчистового раскатка было решено использовать предчистовой калибр открытого типа, который позволяет задавать в чистовой калибр полосы различной ширины и высоты и тем самым регулировать его заполнение. Первый калибр по ходу прокатки является разрезным. В нижней и верхней частях его предусмотрены врезы для предварительного формирования фланцевых элементов профиля. Для надежного распределения металла по элементам асимметричного профиля первый калибр принял закрытым, а регулировать заполнение калибра металлом предусмотрено изменением размеров задаваемого подката. Уширение металла при прокатке рассчитывалось по формуле Бахтинова Б. П., коэффициент стеснения для закрытого калибра принимался равным 0,7, при этом уширение рассчитывалось по среднему (приведенному) обжатию.

Испытание разработанной калибровки проведено на полупромышленном стане 300. Исходные заготовки нагревали в камерной электрической печи до $1100 - 1130^\circ$.

Чистовой четырехвалковый калибр располагали в бесстанинной предварительно напряженной четырехвалковой клети 300 конструкции Днепродзержинского индустриального института. Калибр образован двумя приводными горизонтальными валками диаметром 300 мм и двумя неприводными вертикальными валками диаметром 125 мм. Особенностью данной клети является возможность регулировки вертикальных валков как в радиальном, так и осевом направлениях.

При испытании калибровки профиля (см. рис. 67) применяли исходные подкаты с размерами 58×30 , 60×30 и $60 \times$

$\times 32$ мм. При прокатке из подкатов 58×30 мм наблюдалось незаполнение калибров, а из подката 60×32 мм первый калибр переполнялся по открытым фланцам и не заполнялся по закрытым, что объясняется защемлением подката в закрытой части калибра. При прокатке из подкатов 60×30 мм во втором калибре происходило неполное заполнение калибра по высоте из-за утяжки фланцевых элементов, но при увеличении толщины стенки профиля из предчистового калибра на 1 мм по сравнению с калибровкой было получено запланированное заполнение фланцевых элементов чистового четырехвалкового калибра и горячекатаный профиль соответствовал чертежу (см. рис. 66, б).

Разработанная схема калибровки позволяет прокатывать профили, подобные профилям для рам фильтров, за три фасонных прохода, а также легко регулировать размеры полос, необходимых для полного заполнения чистового четырехвалкового калибра.

Повышение точности формы катаного профиля позволяет сократить расход металла при последующей механической обработке на 13 % и уменьшить трудозатраты в два раза.

ФАСОННЫЕ ПРОФИЛИ С ПРОДОЛЬНЫМИ ПАЗАМИ

В Челябинском НИИМ на экспериментальном прокатном стане 250/105 × 350 освоена [29; 30] прокатка новых экономичных горячекатанных профилей для изготовления поверочных призм ПП-1-00.001 и ПП-2-000.02 по ГОСТ 5641—66.

До разработки новой технологии поверочные призмы изготавливали из полос стали ШХ15, получаемых ковкой из заготовки круглого сечения. При этом малопроизводительная и трудоемкая операция ковки не обеспечивала стабильности исходных полос, приводила к образованию неоднородности твердости металла, которая в некоторых случаях не устранялась термической обработкой. Это вызывало затруднения при сверлении отверстий и повышенный брак по этой операции. Коэффициент использования металла при выпуске изделий из кованых полос составлял 0,22.

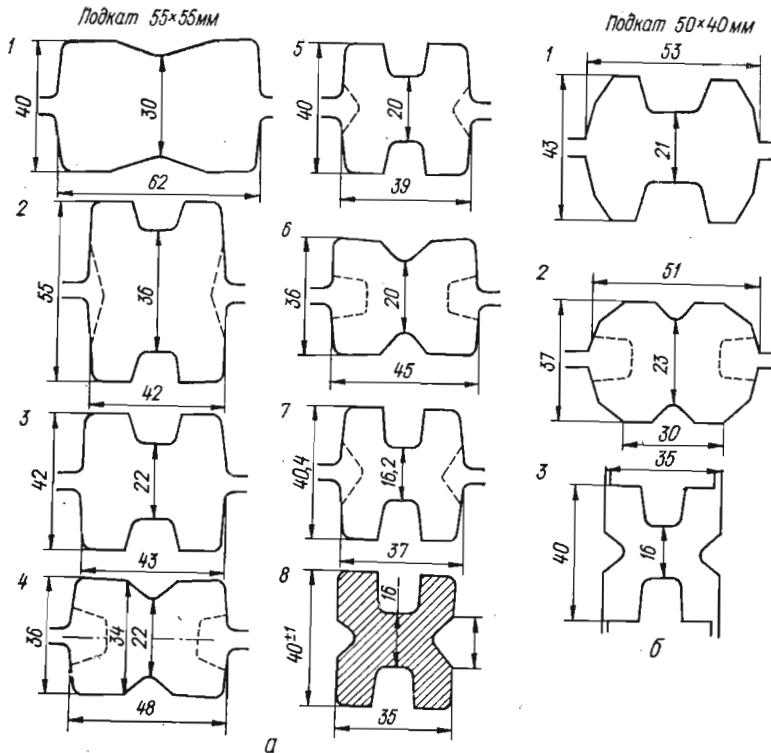


Рис. 68. Калибровка профиля ПП-1 в двухвалковых (а) и с применением четырехвалковых (б) калибров.

Применение горячекатаного фасонного профиля в качестве исходной заготовки позволяет не только исключить операцию ковки, но и повысить скорости резания и увеличить коэффициент использования металла.

Новый профиль для призмы ПП-1 соответствует по форме готовому изделию с необходимыми припусками на механическую обработку. Калибровка профиля (рис. 68, а) включает семь

проходов (1—7). В качестве исходной заготовки при прокатке профиля использовали квадрат со стороной 55 мм. Калибры были нарезаны на стальных валках (сталь 60ХН) диаметром 260 мм.

К особенностям разработанной калибровки следует отнести следующие:

1. Применение двух разрезных калибров подряд (калибры 2 и 3) позволяет окончательно формировать фланцы, образующие призматические пазы; для исключения переполнения в калибре 3 в первом проходе осуществляли предварительный пережим полосы.

2. Из-за невозможности точного определения уширения профиля ширина по дну калибра задается равной ширине (высоте) предыдущего профиля, увеличенной на 1—4 мм.

3. Часть элементов контура окончательно формируется в предчистовом калибре, а часть — в чистовом, что осложняет проектирование калибровки и настройку стана.

Аналогично калибровке профиля ПП-1 выполнена и калибровка профиля корпуса призмы ПП-2.

Применение горячекатанных профилей ПП-1 и ПП-2 позволяет увеличить производительность труда на 15 %, а коэффициент использования металла в 2,1 и 1,49 раза соответственно.

В то же время предложенная калибровка профилей ПП-1 и ПП-2 в двухвалковых калибрах имеет ряд существенных недостатков, из которых основным является большое количество фасонных калибров. Кроме того, необходимы обязательные кантовки почти после каждого прохода.

На рис. 68, б приведена калибровка профиля для корпуса призмы ПП-1 с применением чистового четырехвалкового калибра. Профиль осваивался на полупромышленном стане 300 Днепродзержинского индустриального института. Исходная заготовка имеет прямоугольное сечение 50 × 40 мм. Количество фасонных калибров уменьшено с семи до трех. Профиль соответствует техническим условиям.

Другим примером эффективности применения четырехвалковых калибров при прокатке профилей с продольными

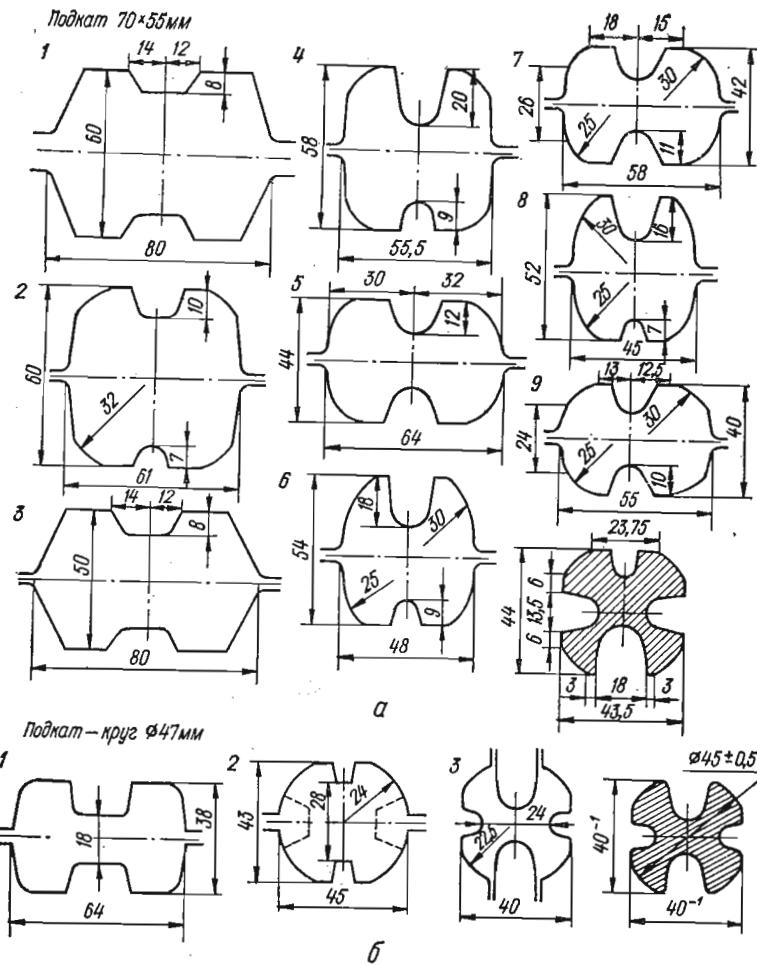


Рис. 69. Калибровки профилей с продольными пазами.

пазами является прокатка нового экономичного профиля «направляющая» (рис. 69, б), необходимого при изготовлении установки для резки арматурной стали.

Фасонный профиль «направляющая» по форме поперечного сечения приближается к «мальтийскому» кресту и описывается окружностью диаметром 45 мм. Профиль имеет четыре продольных радиальных паза, расположенных через 90° , и относится к восьмой группе сложности. Пазы в нижней части выполнены по радиусу, а грани наклонены к вертикали под углом 5° .

При прокатке профилей с продольными пазами с четырех сторон возникают значительные затруднения, так как после кантовки и последующего обжатия раската в обычном (двухвалковом) калиbre боковые контуры пазов не контролируются валками, в результате они изменяют форму и размеры, полученные в предыдущем калиbre. Поэтому при прокатке аналогичных профилей для достижения необходимой точности применяют от пяти до девяти фасонных проходов с небольшими обжатиями.

Разработана калибровка, предусматривающая получение профиля за три фасонных прохода из исходного подкатка круглого сечения (рис. 69, б).

Особенностью калибровки является применение чистового четырехвалкового калибра, в котором предварительно сформированная полоса одновременно обжимается по всему периметру. Чистовой калибр располагали в четырехвалковой клети 300 конструкции Днепродзержинского индустриального института, позволяющей регулировать вертикальные валки как в радиальном, так и в осевом направлениях.

В результате проведения опытной прокатки установлено, что для получения готового профиля в соответствии с техническим условием требуются фасонные подкаты с предчистовым калибром следующих размеров, мм: высота полусы $41,1-41,5$, ширина $42,4-42,8$, толщина шейки — $23,2-23,6$ и ширина канавки для глубокого паза — $16,2-16,4$. Оптимальным подкатом, задаваемым в первый фасонный калибр, является

круг диаметром 47 мм. Коэффициенты вытяжки по проходам 1,27; 1,18 и 1,3.

Разработанная калибровка может быть применена на станах, оборудованных кассетами с неприводными вертикальными валками или четырехвалковыми клетями. Применение профиля позволяет уменьшить расход металла на 36 %.

Для сравнения на рис. 69, а приведена калибровка профиля с продольными пазами, который по форме аналогичен профилю «направляющая». Этот профиль с продольными пазами освоен на экспериментальном прокатном стане 250/105 × 350 Челябинского НИИМ. Прокатка осуществляется в двухвалковых калибрах за девять фасонных проходов и предусматривает восемь кантовок.

ПРОФИЛЬ ДВОЯКОВОГНУТОЙ ФОРМЫ

Симметричный профиль двояковогнутой формы для сельскохозяйственного машиностроения (рис. 70) образован двумя дугами $R = 115$ мм в вертикальной плоскости и двумя полуциркульными углублениями по боковым граням. Профиль изготавливается из стали 20 по ГОСТ 1050—74 и поставляется в нагартованном состоянии. Поверхность его должна соответствовать 4-му классу точности группы В по ГОСТ 1051—73.

Профиль может быть получен по следующим технологическим схемам.

Схема 1. Горячая прокатка фасонного подкатка в двухвалковых калибрах с последующим волочением на готовый профиль за три-четыре прохода.

Основными недостатками этой технологической схемы являются: необходимость нескольких проходов при волочении вследствие отсутствия углублений на боковых гранях профиля и малой толщины средней части профиля; сложность изготовления фасонных волок высокой точности из-за большой их ширины и большого отношения ширины к высоте профиля; необходимость остremления перед волочением передних кон-

цов полос, что является довольно трудоемкой и сложной операцией.

Схема 2. Горячая прокатка фасонного подкатка повышенной точности с использованием в чистовом проходе четырехвалкового калибра и волочение горячекатаного фасонного подкатка на готовый профиль за один проход.

Эта схема сокращает число проходов при волочении за счет приближения формы горячекатаного подкатка к форме

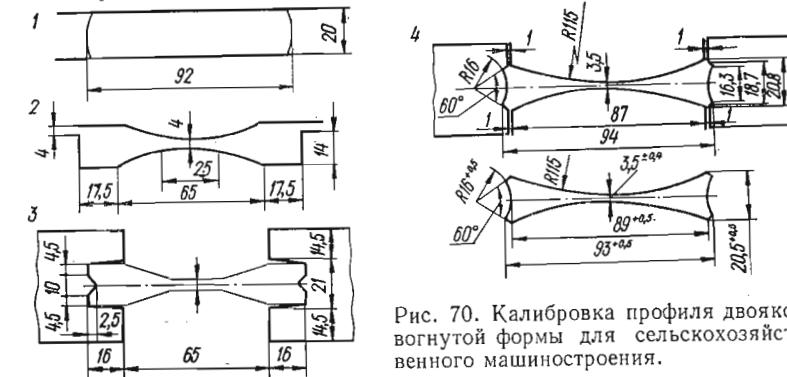


Рис. 70. Калибровка профиля двояковогнутой формы для сельскохозяйственного машиностроения.

готового профиля, но не устраниет основного недостатка — сложности изготовления фасонных волок высокой точности и остремления концов полос.

Схема 3. Горячая прокатка фасонного подкатка повышенной точности с использованием в чистовом проходе четырехвалкового калибра с последующей холодной прокаткой за один проход в четырехвалковом калибре.

Технологическая схема 3 устраняет основные недостатки схем 1 и 2, так как не требуется изготавливать сложные фасонные волоки высокой точности. Кроме того, увеличивается производительность и уменьшается расход металла. Некоторым недостатком схемы следует считать снижение точности и возможность отсутствия обжатия в разъемах калибра при холодной прокатке.

Таким образом, наиболее рациональной является схема 3, которая и была принята для производства профиля двояковогнутой формы на полупромышленном стане 300.

Разработанная калибровка предусматривает получение горячекатаного подката за четыре прохода из заготовки круглого сечения диаметром 65 мм. При проектировании калибровки стремились к тому, чтобы неравномерная деформация осуществлялась в основном в первых по ходу прокатки калибрах 1 и 2. Распределение коэффициентов обжатия в калибрах 1, 2 и 4 приведено на рис. 71.

Для исследования заполнения металлом калибров использовались заготовки круглого сечения диаметром от 49 до 65 мм. При обжатии заготовки диаметром 49 мм в калибре 1 была получена полоса прямоугольного сечения 66×22 мм. При максимальном обжатии 27 мм уширение составило 17 мм, а коэффициент вытяжки — 1,36. В калибре 2 ширина полосы увеличивается до 85,6 мм, что значительно меньше расчетной, которая должна быть равной 100 мм.

При использовании заготовки диаметром 55 мм по той же схеме ширина полосы в калибре 2 составляет 94,8 мм, что также недостаточно. Поэтому в ходе дальнейших исследований использовались заготовки диаметром 62 и 65 мм.

При прокатке из заготовки диаметром 63 мм в калибре 1 получена полоса сечением $20 \times 82,5$ мм. Коэффициент вытяжки — 1,83. После калибра 2 ширина полосы увеличивается до 99,7 мм. Однако при этом недостаточно хорошо заполняются углы профиля.

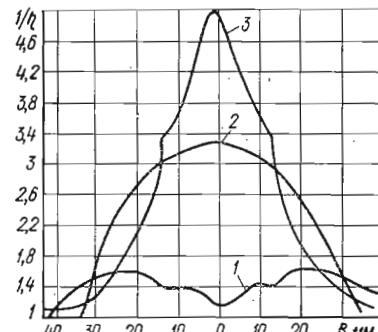


Рис. 71. Распределение коэффициентов обжатия в калибрах 1 (кривая 2), 2 (кривая 3) и 4 (кривая 1).

При использовании заготовки диаметром 65 мм после калибра 1 получена раскат сечением $20,2 \times 91,8$ мм. Коэффициент вытяжки — 1,91. В калибре 2 наблюдалось хорошее заполнение, что обеспечивало в дальнейшем получение горячекатаного подката заданных размеров.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Прокатка двояковогнутого профиля из заготовки диаметром менее 60 мм является нецелесообразной вследствие недостаточной ширины полосы уже в калибрах 1 и 2.
2. При прокатке из заготовки диаметром 62 мм наблюдается незаполнение углов в калибрах 2 и 3. Горячекатаный подкат после калибра 4 имеет недостаточную общую ширину и высоту крайних частей профиля.
3. При прокатке из заготовки диаметром 65 мм имеет место удовлетворительное заполнение калибров и размеры горячекатаного подката соответствуют заданным.
4. Для получения подката с одинаковыми толщинами боковых частей необходимо обеспечить симметричную задачу полосы в калибр 2, что может быть достигнуто за счет правильной установки вводной валковой арматуры.

ПРОФИЛЬ ДЛЯ ДВЕРНОЙ ПЕТЛИ АВТОМОБИЛЯ

По проекту Запорожского автозавода «Коммунар» готовую деталь неподвижного звена дверной петли нового автомобиля ЗАЗ-1102 (рис. 72, а) было запланировано изготавливать штамповкой из полосового проката 14×20 мм с последующим удалением облоя и обработкой поковок протяжкой.

Отраслевой лабораторией прокатки Днепродзержинского индустриального института разработан и предложен фасонный профиль проката, по форме и размерам поперечного сечения (рис. 72, б) максимально приближающийся к готовой детали. Профиль имеет П-образное сечение с высокими массивными полками и тонкой стенкой, изготавливается из стали 20 по ГОСТ 1050—74 и поставляется в нагартованном состоянии

с чистотой поверхности по 4-му классу (группа В, ГОСТ 1051—73).

Применение предложенного профиля для изготовления детали неподвижного звена по сравнению с проектной технологией уменьшает расход металла в 1,4 раза и сокращает число технологических операций в два раза.

Наличие у профиля высоких массивных полок с параллельными гранями сравнительно тонкой стенки, а также боковых

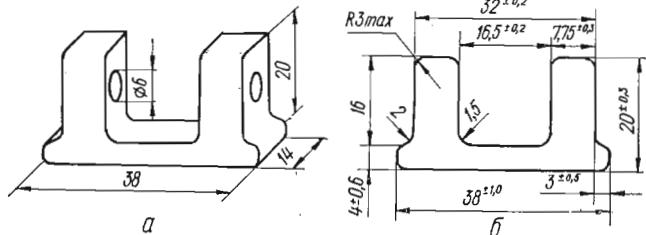


Рис. 72. Готовая деталь (а) и профиль (б) для дверной петли автомобиля.

выступов создает определенные трудности при прокатке за малое число проходов.

Для получения данного профиля повышенной точности в условиях четырехклетевого непрерывного стана 300 Череповецкого сталепрокатного завода разработана технология, включающая горячую прокатку фасонного подкатка за четыре прохода с последующей его холодной прокаткой в четырехвалковых калибрах на готовый профиль за один проход.

Отличительной особенностью выполненной калибровки (рис. 73) является использование исходной заготовки круглого сечения и применение четырехвалковых калибров как при горячей (калибр 3), так и при холодной (калибр 5) прокатке.

По разработанной калибровке в первых двух калибрах швеллерного типа из исходной заготовки диаметром 36 мм фор-

мируется черновой П-образный раскат с отогнутыми под углом 20° полками. Затем раскат поступает в предчистовой четырехвалковый калибр, где выполняется подгибка и обжатие полок по толщине, а также утонение стенки и формирование боковых выступов. Для образования выступов нижние углы четырехвалкового калибра 3 имеют специальный простор для

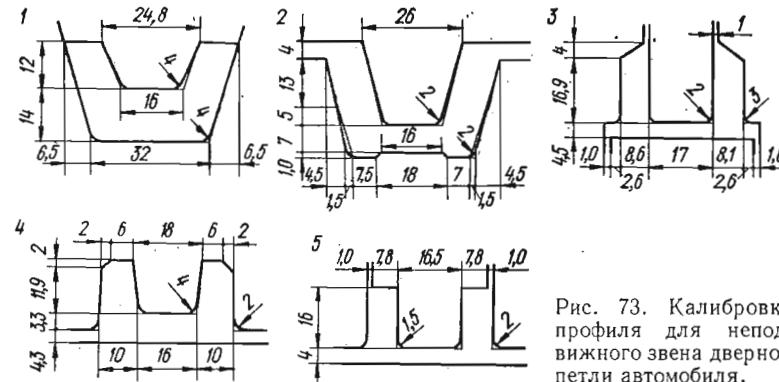


Рис. 73. Калибровка профиля для неподвижного звена дверной петли автомобиля.

уширения металла, который заполняется при обжатии массивных углов раската, поступающего из калибра 2.

Требуемая высота боковых выступов достигается изменением толщины стенки задаваемого раската.

Чистовой калибр 4 горячей прокатки предназначен только для контроля высоты полок, и поэтому обжатие по стенке профиля не предусматривается.

Полученный горячекатанный подкат после травления и известкования поступает на стан холодной прокатки, где прокатывается за один проход в четырехвалковом калибре с абсолютным обжатием 0,5 мм со стороны каждого вала, что обеспечивает формирование готового профиля повышенной точности и с необходимой чистотой поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 942822 (СССР).
2. А. с. 942823 (СССР).
3. А. с. 946701 (СССР).
4. А. с. 956077 (СССР).
5. Грицук Н. Ф., Медведев В. С., Писаренко Ф. А. Классификация сортовых профилей отраслевого и специального назначения.— Сортопрокат. пр-во, 1974, вып. 2, с. 20—22.
6. Горячее прессование труб и профилей / Ю. В. Манегин, А. Е. Притоманов, Т. Шпиттель, А. Кнаушер.— М.: Металлургия, 1980.— 282 с.
7. Зюзин В. И. Станы для производства специальных фасонных профилей за рулем. — Металлург. оборуд. / НИИинформтяжмаш, 1970, № 14.— 62 с.
8. Илюкович Б. М., Баакашвили В. С., Бединейшвили Р. В. Теоретические основы обработки металлов давлением.— Тбилиси: Сабчота Сакартвело, 1979.— 664 с.
9. Илюкович Б. М., Измайлова М. К., Мединский Г. А. Определение коэффициента вытяжки при прокатке профилей двутавровой формы с помощью математической теории планирования эксперимента.— Днепродзержинск, 1980.— 7 с.— Рукопись деп. в УкрНИИТИ.
10. Илюкович Б. М., Есипов В. Д., Измайлова М. К. Кинематика очага деформации при прокатке двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах.— Днепродзержинск, 1981.— 12 с.— Рукопись деп. в УкрНИИТИ.
11. Краузе Г. Н., Якимушкин В. П. Производство крупносортных профилей.— Прокат. и волоч. пр-во, 1976, т. 8, с. 41—87.
12. Калибровка сложных профилей: (Справочник) / Н. Е. Скороходов, Б. М. Илюкович, И. П. Шулаев и др.— М.: Металлургия, 1979.— 232 с.
13. Освоение производства двутавровых балок и швеллеров с применением кассет с вертикальными валками конструкции ДМетИ / А. П. Чекмарев, В. Н. Гринавцев, А. Н. Несмачный и др.— Науч. тр. Днепропетров. металлург. ин-та, 1976, № 59, с. 87—94.
14. Определение кинематически возможного поля скоростей при прокатке П-образных профилей в четырехвалковых калибрах / Б. М. Илюкович, В. Д. Есипов, Н. Е. Нехаев, М. К. Измайлова.— Днепродзержинск, 1981.— 11 с.— Рукопись деп. в УкрНИИТИ.
15. Производство и применение стальных фасонных профилей высокой точности / И. Ф. Махнев, Х. Б. Гроссман, М. Я. Гамбург, Э. А. Толстых.— Ижевск : Удмуртия, 1967.— 84 с.
16. Производство сортового проката в широком сортаменте / Н. Ф. Грицук, Х. М. Сапрыгин, И. В. Гунин и др.— М. : Металлургия, 1973.— 272 с.
17. Перлин И. Л., Райтбарг Л. Х. Теория прессования металлов.— М. : Металлургия, 1975.— 448 с.
18. Постоногов Ю. А., Хабибанд Ч. Калибровка и прокатка балок с параллельными полками на стане с одной универсальной клетью.— Сталь, 1976, № 6, с. 534—537.
19. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов.— М. : Металлургия, 1976.— 488 с.
20. Прокатка двутавровых балок на стане 650 с применением кассет с неприводными валками / В. Н. Гринавцев, Ю. В. Рождественский, В. Л. Барбаров, П. Д. Криштаfovич.— Сталь, 1976, № 5, с. 432—434.
21. Полухин В. П., Полухин П. И., Николаев В. А. Составной рабочий инструмент прокатных станов.— М. : Металлургия, 1977.— 87 с.
22. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шефер и др.— М. : Мир, 1977.— 552 с.
23. Производство фасонных профилей высокой точности / В. Н. Выдрин, А. Б. Гросман, В. К. Павлов, В. С. Нагорнов.— М. : Металлургия, 1977.— 184 с.
24. Прокатка двутавровых балок с применением чистовой универсальной клети / И. А. Критинин, А. Ф. Кузнецов, И. К. Лысенко и др.— Сталь, 1978, № 8, с. 722—726.
25. Поляков М. Г., Никифоров Б. А., Гун Г. С. Деформация металла в многовалковых калибрах.— М. : Металлургия, 1979.— 240 с.
26. Петров А. И., Лойферман М. А., Девятников А. Г. Фасонные профили.— Ижевск : Госкомиздат Удм. АССР, 1981.— 112 с.
27. Продукция черной металлургии. Каталог. Прокат черных металлов. Профили сортовые и фасонные высокой точности / И. Л. Зайцев, В. А. Тарасов, В. Н. Сорокин и др.— М. : ЦНИИ информ. и технико-экон. исслед. чер. металлургии, 1981.— Ч. 1. 188 с.
28. Продукция черной металлургии. Каталог. Прокат черных металлов. Профили сортовые и фасонные высокой точности / И. Л. Зайцев, В. А. Тарасов, В. Н. Сорокин и др.— М. : ЦНИИ информ. и технико-экон. исслед. чер. металлургии, 1981.— Ч. 2. 66 с.
29. Реззов Б. С., Пашнин В. А., Антипов В. Ф. Освоение нового профиля корпуса призмы ПП-1.— Чер. металлургия : Бюл. НТИ, 1978, № 19, с. 33—34.
30. Реззов Б. С., Пашнин В. А., Шепетко О. Ф. Освоение нового фасонного профиля для корпуса призмы ПП-2.— Чер. металлургия : Бюл. НТИ, 1980, № 18, с. 51—55.
31. Склокин Н. Ф., Бродов А. А. Основные направления и экономика улучшения качества черных металлов.— М. : Металлургия, 1974.— 96 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

32. Сортовые профили проката / В. В. Лемпицкий, И. П. Шулаев, М. С. Тришевский и др. — М. : Металлургия, 1981.— 624 с.
33. Тарновский И. Я., Скородов А. Н., Илокович Б. М. Элементы теории прокатки сложных профилей.— М. : Металлургия, 1972.— 352 с.
34. Уральский В. И., Плахотин В. С. Производство фасонных профилей методом гидропрессования.— М. : Металлургия, 1978.— 168 с.
35. Чиченев Н. А., Кудрин А. Б., Полухин П. И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением.— М. : Металлургия, 1977.— 312 с.
36. Экспериментальные исследования формоизменения металла в несимметричных калибрах крестообразной формы / В. Д. Есипов, А. Б. Илюкович, С. Г. Гончаренко, А. И. Король.— Изв. вузов. Сер. Чер. металлургия, 1981, № 2, с. 66—69.

	Стр.
Предисловие	3
Г л а в а 1. Способы производства профилей сложной формы	6
Горячая прокатка фасонных профилей	6
Прессование сложных стальных профилей	12
Волочение фасонных профилей	18
Производство стальных фасонных профилей высокой точности	23
Г л а в а 2. Прокатка фасонных профилей с использованием четырехвалковых калибров	38
Основные особенности четырехвалковых калибров	38
Прокатка двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах	41
Прокатка мелкосортных профилей в четырехвалковых калибрах	47
Технологическая классификация профилей, прокатываемых с применением четырехвалковых калибров	54
Г л а в а 3. Теоретические исследования формоизменения и энергосиловых параметров в четырехвалковых калибрах	60
Вариационные методы исследования формоизменения и энергосиловых параметров	60
Определение формоизменения и энергосиловых параметров при прокатке П-образных профилей	67
Построение обобщенной математической модели процесса прокатки фланцевых профилей в четырехвалковых калибрах	75
Г л а в а 4. Экспериментальные исследования процесса прокатки в формирующих и четырехвалковых калибрах	82
Методика экспериментальных исследований	82
Прокатка в формирующих двухвалковых калибрах	83
Прокатка двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах	90
Прокатка П-образных профилей в четырехвалковых калибрах	92
Прокатка асимметричных двутавровых профилей в четырехвалковых калибрах	94
Г л а в а 5. Методика расчета формоизменения при прокатке фасонных профилей	96
Факторы формы калибра, определяющие течение металла в очаге деформации	96
Методы приведения фасонного калибра к соответственному	99
Расчет формоизменения при прокатке в соответственном калибре с помощью вариационных методов	104

Проверочный расчет калибровки крестообразного профиля $48 \times 34 \times 12 \times 7$ мм	111
Г л а в а 6. Конструкции четырехвалковых клетей	114
Универсальные клети для прокатки двутавровых балок	114
Четырехвалковые клети для прокатки мелкосортных профилей	125
Кассеты с неприводными вертикальными валками	142
Конструкция составных прокатных валков	151
Валковая арматура	154
Г л а в а 7. Прокатка и калибровка фасонных профилей с применением четырехвалковых калибров	159
Профильт для шины табулятора пишущих машин	159
Профильт для трикотажного машиностроения	164
Фасонный П-образный профильт повышенной точности	167
Корытный профильт повышенной точности	169
Профильт для рам фильтров	174
Фасонные профили с продольными пазами	177
Профильт двояковогнутой формы	182
Профильт для дверной петли автомобиля	185
Список литературы	188

*Василий Дмитриевич Есинов, канд. техн. наук
Будимир Михайлович Илюкович, д-р техн. наук
Юрий Сергеевич Чернобровенко, канд. техн. наук
Иван Никитич Киреев*

Прокатка специальных профилей сложной формы

Редактор *Л. А. Казанцева*
Оформление художника *В. И. Диброва*
Художественные редакторы *Л. А. Дикарев, Н. Ф. Соловьева*
Технический редактор *Е. М. Горюховская*
Корректоры *Л. А. Москаленко, Л. В. Попович*

Информ. бланк № 2527

Сдано в набор 03.03.84. Подписано в печать 11.09.84. БФ 02530. Формат 70×108^{1/32}.
Бумага типогр. № 1. Гарн. лит. Печ. выс. Усл. печ. л. 8,4. Усл. кр.-отт. 8,83.
Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 1000 экз. Заказ № 4—136. Цена 75 к.

Издательство «Техника», 252601, Киев, 1, Крещатик, 5.

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканского производственного объединения «Полиграфкнига». 252057, Киев, ул. Довженко, 3 на Киевской книжной ф-ке «Жовтень», ул. Артема, 25.

75 к.

ПРОКАТКА
СПЕЦИАЛЬНЫХ
ПРОФИЛЕЙ
СЛОЖНОЙ
ФОРМЫ

