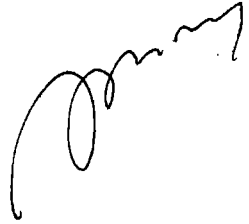


На правах рукописи

Туев Михаил Юрьевич



Разработка и исследование процессов и установок циклической деформации заготовок

Специальность: 05. 02. 13 – Машины, агрегаты и процессы металлургического
производства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург
2006

Работа выполнена на кафедре «Механика» Российского государственного профессионально-педагогического университета

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Лехов Олег Степанович

Официальный оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Гоглиб Борис Михайлович
- кандидат технических наук, доцент
Губарев Александр Павлович

Ведущее предприятие - ОАО Уральский институт металлов

Защита состоится 16 июня 2006 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.285.10 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Уральском государственном техническом университете, ауд. М-323.

Ваш отзыв, заверенный печатью, просим направлять по адресу:
620002, г.
Екатеринбург, К-2, УГТУ, Ученому секретарю совета
института, тел.374-45-74.

Автореферат разослан _____ 2006 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Е.Ю.Раскатов

Общая характеристика

Актуальность проблемы. В настоящее время оборудование многих заводов черной металлургии является морально устаревшим и физически изношенным, что сопровождается частыми поломками оборудования, снижением качества металлопродукции, большим расходом металла, топлива и электроэнергии. Многие металлургические заводы в настоящее время достигли такого положения, что для необходимых мероприятий по всеобъемлющей модернизации и капитальным ремонтам требуются денежные средства в таком объеме, который экономически уже неприемлем. Также и сооружение нового металлургического завода с полным циклом для вкладчиков капитала вообще, и для частных фирм в особенности, по финансовым причинам едва ли осуществимо. Кроме того, наблюдается серьезное отставание в области передовой технологии от зарубежных стран.

Внедрение инновационных технологических процессов и оборудования на заводах черной металлургии на современном этапе является весьма актуальным и возможно лишь на основе создания уникального оборудования и технологий на основе низкобюджетной реконструкции имеющегося оборудования существующих цехов. Внедрение ресурсосберегающих и малоотходных технологических процессов, ориентированных на применение непрерывнолитой заготовки позволит сократить производственные площади, удельные капитальные и эксплуатационные расходы, повысить производительность труда и качество продукции.

Разработка этого прогрессивного направления требует решения принципиально новых задач, охватывающих широкий круг вопросов от разработки методики расчета параметров агрегатов до создания новых процессов и установок циклической деформации для ковочных и литейно-ковочных модулей.

Цель работы. Разработка и совершенствование процессов и установок циклической деформации и создание научно-обоснованной методики расчета их параметров.

Научная новизна. Разработаны научные основы создания процессов циклической деформации, предложены новые конструкции установок циклической деформации и создана научно-обоснованная методика расчета их параметров.

При этом получены новые научные положения и результаты:

- на основе теоретического и экспериментального исследования процесса циклической деформации бойками непрерывнолитого сляба с дефектами в поверхностных слоях определены поля напряжений и скоростей деформации;

- проанализировано поведение дефектов при циклической деформации непрерывнолитых заготовок, дана оценка нового способа деформации с точки зрения улучшения качества заготовок;
- разработаны и научно обоснованы новые конструкции установок циклической деформации;
- разработана методика расчета геометрических, кинематических, технологических и энергосиловых параметров процессов и установок циклической деформации.

Практическая ценность и реализация результатов работы

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые технические и технологические решения, обеспечивающие создание технологии и оборудования циклической деформации заготовок.

ОАО «Уралмаш» изготовил опытно-промышленную установку циклической деформации усилием 3500 кН, которая установлена на Омутнинском металлургическом заводе.

Изготовлены и установлены на опытном заводе Уральского института металлов установки циклической деформации, выполненные в виде ковочных блоков, для создания которых использована клеть стана 300 с линией привода.

Разработана конструкторская документация и изготовлен литейно-ковочный модуль для создания экспериментального участка в Институте машиноведения Дальневосточного отделения РАН в городе Комсомольск-на-Амуре.

Разработана конструкторская документация на агрегат циклической деформации для производства сортовых профилей в линии непрерывной разливки стали для НПО «Тулачермет».

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований создано четыре экспериментальных участка, в которых получили развитие различные конструкторские решения агрегатов циклической деформации и проведен большой объем экспериментальных исследований.

На защиту вынесены следующие основные положения:

- конструкции установок циклической деформации;
- технология процесса циклической деформации профилей простой и сложной формы;
- постановка задачи и результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла в очаге циклической деформации при получении листовой заготовки из нержавеющей стали;
- методика расчета основных параметров установки циклической деформации;

- результаты расчета кинематических параметров привода бойков установок циклической деформации с двумя эксцентриковыми валами в линии привода, выполненных в виде ковочных блоков;
- рекомендации по выбору конструкции и параметров процессов и установок циклической деформации;
- результаты промышленных исследований установок циклической деформации.
- исследование влияния циклической деформации на структуру металла;
- перспективы внедрения процессов и установок циклической деформации.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на: Всесоюзной конференции «Технология и средства производства заготовок деталей машин» (Свердловск, 1983г.); зональной конференции «Автоматизация процессов обработки металлов давлением» (Пенза, 1986г.); областной конференции «Современные вопросы динамики и прочности в машиностроении» (Пермь, 1985 г.); Всесоюзной конференции «Металл и технический прогресс» (Москва, 1987г.); Всесоюзной конференции «Металл» (Абакан, 1988г.); Урало-Сибирской научно-практической конференции (Екатеринбург, 2003 г.).

Объем работы. Содержание работы изложено на 127 страницах машинописного текста, иллюстрировано 42 рисунка, содержит 4 таблицы, библиографический список, включающий 70 научных работ.

Основное содержание работы

1. Технология и конструкции установок с высокими обжатиями циклического действия.

Существенная задача металлургического машиностроения заключается в том, чтобы предоставить в распоряжение металлургии такие производственные агрегаты, которые в соответствии с тенденцией технического развития обеспечивали бы возможность гибкого, компактного и экономичного производства на основе новых технологий. Наглядная тенденция развития технологии производства стали – создание литейно-прокатных комплексов с модульным принципом проектирования оборудования, и в перспективе, создание литейно-ковочных модулей.

Одним из основных направлений повышения эффективности прокатного производства является разработка совмещенных процессов непрерывного литья и прокатки. Однако совмещение процессов непрерывного литья и прокатки следует рассматривать не только с точки зрения согласования производительности этих процессов, а что не менее важно, также и с точки зрения получения качественного проката,

поскольку непрерывнолитые заготовки имеют поверхностные и внутренние дефекты и в осевой зоне образуются ликвация, пористость, раковины. В связи с этим агрегаты, входящие в состав литейно-прокатного комплекса и предназначенные для деформации непрерывнолитых заготовок, должны обеспечить получение качественного проката и увеличение выхода годного.

В связи с этим особенно актуальными являются работы по созданию принципиально новых агрегатов, отличающихся высокой жесткостью и прочностью. Такие агрегаты предназначены для циклической деформации непрерывнолитых заготовок в узком температурном интервале, в условиях близких к всестороннему сжатию, непосредственно на выходе из кристаллизатора или совмещенных с ним, со степенью деформации 80 % и выше за проход и со скоростью, равной скорости выхода слитка из кристаллизатора и выше, с целью получения заготовок для листовых, сортовых, балочных и других станов.

Создание таких комплексов позволит сократить производственные площади, удельные капитальные и эксплуатационные расходы, существенно снизить расход металла, энергии, повысить производительность труда и качество продукции, обрабатывать малопластичные и труднодеформируемые стали и сплавы.

В черновых группах клетей непрерывных станов все большее применение находят агрегаты циклической деформации различных конструкций. Первым в ряду агрегатов для деформации с большими обжатиями, колебательно-ковочный агрегат типа Кокс для производства сортового проката был разработан еще в 1954 г. Установленный на заводе фирмы «Лэклид стил» (США), он выполняет роль черновой линии мелкосортно-проволочного стана, обжимая непрерывнолитую заготовку сечением 178×178 мм до сечения 82×82 с вытяжкой 4,7.

В состав литейно-прокатных модулей для получения листа в основном используются полосовые планетарные станы конструкции Круппа – Плацера или фирмы “Сендзимир”. При прокатке нагретых полос степень деформации на этих станах за один проход составляет 90 – 98%.

Одним из перспективных направлений совершенствования агрегатов этой группы является создание ковочных машин проходного типа.

Особый интерес представляет радиально – обжимная машина (РОМ) проходного типа, предназначена для выполнения операций протяжки и калибровки. Бойки в таких машинах одновременно с движением перпендикулярно оси заготовки перемещаются вдоль ее оси на обжимаемом участке. Это позволяет осуществлять подачу заготовки бойками без использования манипулятора, причем скорость подачи может достигать 0,5 м/с.

Общими чертами для всех рассмотренных агрегатов с высокими обжатиями являются: циклическое действие на заготовку; малые единичные обжатия при больших суммарных деформациях; движение инструмента по

замкнутым траекториям; шаговая подача заготовки в очаг деформации; наличие конуса деформации, в котором процесс обжатия может быть представлен, как осадка, или раскатывание выдавленной волны, или прокатка тонкого слоя металла. Важным условием является создание благоприятной схемы напряженного состояния в очаге деформации, особенно при деформации непрерывнолитого металла непосредственно при выходе из МНЛЗ. Важным является простота и надежность самой конструкции.

Не менее важно и более перспективным является деформация непрерывнолитых заготовок в период их кристаллизации, что позволяет добиться исключительных экономических показателей и качества изделий. Идея установки для деформирования кристаллизирующихся заготовок разработана профессором В. И. Одиноквым и реализована группой авторов, в которую входит и Туев М. Ю. Работы в этом направлении ведутся по всему миру с различными подходами к этой проблеме и различной продвинутой в результатах.

В работе В. И. Одиноква, В.В. Стулова отмечается, что повышение эффективности производства непрерывнолитых заготовок достигается разработкой новых приемов воздействия на жидкий и кристаллизирующийся металл. Разборный кристаллизатор выполнен в виде обжимных плит, образует замкнутый калибр и устанавливается в агрегат циклической деформации различных конструкций.

Наряду с проблемами, свойственными для процессов совмещения литья и деформации, которые удалось решить, остается одна, требующая решения – обеспечение стойкости инструмента. Передовые результаты получены на литейно-ковочном модуле экспериментального участка, созданном на базе агрегата циклической деформации в Институте машиноведения Дальневосточного отделения РАН в городе Комсомольск – на – Амуре под руководством Одиноква В. И.. Технология включает эндогенное суспензионное литье с помощью различных технологических приемов внешнего воздействия, оказывающего зародышеобразующее действие на затвердевание металла.

Таким образом, агрегаты и процессы циклической деформации находят все большее применение как в литейно-прокатных комплексах, так и в литейно-ковочных модулях. По скоростным и качественным показателям они являются наиболее оптимальными и перспективными при использовании в передовых технологиях производства стали.

2. Разработка и расчет параметров установок циклической деформации

Агрегат циклической деформации с приводом от четырех эксцентриковых валов защищен международными заявками и патентами зарубежных стран, установлен на металлургическом заводе и предназначен для получения длинномерных заготовок простой и сложной формы из

различных марок сталей и сплавов по четырех-бойковой схеме деформации (Рис.1).

A – A

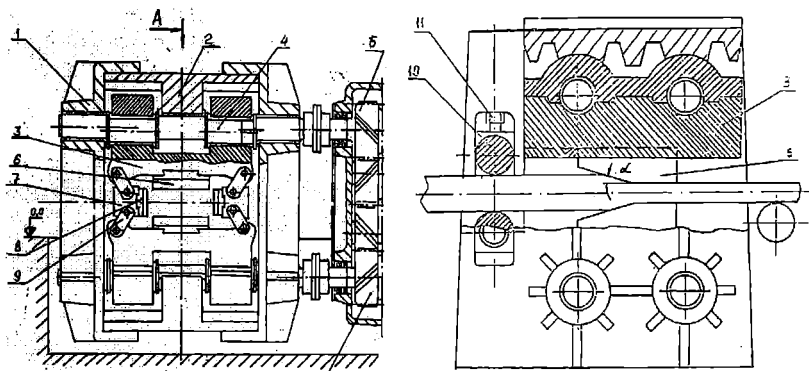


Рис.1 Агрегат циклической деформации (АЦД)

Станина 1, поперечные балки 2, эксцентриковые валы 4, редуктор 5, рабочие бойки 6, дополнительные суппорта 7, рабочие бойки 8, стяжки 9, задающее устройство 10, нажимной механизм 11

Конструкция агрегата позволяет одновременно или попеременно обжимать заготовку в двух взаимно перпендикулярных плоскостях со степенью деформации до 80%, причем из исходной стандартной заготовки за один проход получается изделие требуемого поперечного сечения. Цикл обработки заготовки состоит из времени, затраченного на деформирование металла бойками (t_p) и времени холостого хода бойков ($t_{хх}$). Агрегат циклической деформации может работать как в режиме самоподачи, так и в режиме принудительной подачи. В режиме самоподачи во время холостого хода бойков заготовка неподвижна, а при работе в режиме принудительной подачи заготовка подается в бойки на величину $S_{хх}$. Схема деформации металла бойками показана на рис. 2.

Во время деформации заготовка обжимается бойками на величину единичного обжатия Δh и одновременно продвигается на величину S_p .

$$\Delta h = 2e(1 - \cos\varphi); \quad S_p = e\sin\varphi, \quad (1)$$

где, e – величина эксцентриситета эксцентрикового вала;
 φ – угол обжатия.

Величина принудительной подачи определяется по формуле:

$$S_{хх} = 0,5\Delta h \operatorname{ctg}\alpha - S_p, \quad (2)$$

где α – угол наклона рабочей поверхности бойка.

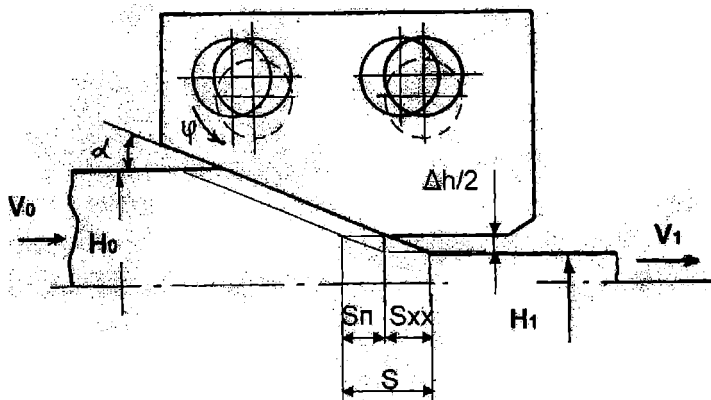


Рис.2 Схема процесса циклической деформации металла бойками

Тогда суммарная величина подачи

$$S = 0,5\Delta hctg\alpha \quad (3)$$

Временные характеристики можно определить по формуле:

$$t_d = 60/n; \quad t_p = t_d\varphi/2\pi; \quad t_{xx} = t_d - t_p, \quad (4)$$

где t_d – время одного цикла, с;

n – частота вращения эксцентрикового вала, об/мин.;

φ – угол поворота эксцентрикового вала при рабочем ходе бойка, рад.

Заготовка подается в бойки рольгангом или задающим устройством со скоростью V_{xx} , равной

$$V_{xx} = S_{xx}/t_{xx} = \frac{60 \cdot n \cdot e \cdot [(1 - \cos\varphi) - \sin\varphi]}{1 - \varphi/2\pi} \quad (5)$$

Одной из самых важных технологических характеристик агрегата циклической деформации является средняя скорость прокатки на входе V_0 и выходе V_1 из клетки.

Процесс циклической деформации при одном цикле нагружения можно идентифицировать с осадной заготовки в наклонных бойках с одновременным продвижением по направлению прокатки. Для определения средней скорости металла на входе в очаг деформации рассмотрим перемещение S_0 недеформированного конца заготовки за один цикл деформации. Это перемещение состоит из продольного перемещения металла S_{xx} за время холостого хода бойков АЦД, перемещения S_d металла бойками во время деформации и перемещения металла S_d за счет истечения металла под действием деформирующей силы. В результате этого можно записать:

$$S_0 = S_{xx} + S_p - S_d \quad (6)$$

Разделив на время одного цикла, определим среднюю скорость

$$V_0 = \frac{S_0}{t_q} = \frac{1}{t_q} (0.5 \Delta h c t g \alpha - S_d) \quad (7)$$

движения металла на входе в АЦД в м/мин.

Средняя скорость на выходе из клетки АЦД определится с учетом средней вытяжки.

$$V_1 = V_0 \lambda_{cp} \quad (8)$$

В процессе циклической деформации для полного формоизменения объема металла от входа в очаг деформации до выхода из него необходимо несколько циклов деформации металла бойками. Число циклов деформации Z можно определить из геометрических соображений (рис.2).

$$Z = \frac{H_0 - H_1}{2 S_{xx} t g \alpha} \quad (9)$$

Если учесть, что общая вытяжка при циклической деформации составляет $\lambda = F_0 / F_1$, то выражение для определения средней вытяжки за один цикл нагружения будет иметь вид:

$$\lambda_{cp} = \sqrt[Z]{F_0 / F_1} = \left(\frac{F_0}{F_1} \right)^{\frac{2 S_{xx} t g \alpha}{H_0 - H_1}} \quad (10)$$

где, F_0, F_1 – соответственно площади поперечных сечений заготовки до и после деформации.

Рассмотрим технологические и конструктивные возможности агрегата:

1. Одновременная деформация четырьмя бойками с наклонными рабочими поверхностями заготовки по высоте и ширине и усилие подпора в направлении подачи создают в очаге деформации схему напряженного состояния близкую к всестороннему сжатию, которая при условии циклической деформации с небольшими единичными обжатиями (5÷30 мм) в узком температурном интервале позволяет успешно обрабатывать малопластичные и труднодеформируемые стали и сплавы, а также непрерывнолитые заготовки;

2. Четыре бойка образуют объемный калибр, размеры которого могут изменяться вдоль рабочей части как по высоте, так и по ширине, что позволяет получать широкий сортамент заготовок (листовых, двутавровых, сортовых и т. д.), поскольку калибр в один момент времени имеет на входе профиль исходной заготовки, а на выходе заданный профиль. Наличие калибрующих участков и высокая устойчивость раската в совокупности с вышеизложенными условиями деформации позволяют существенно улучшить качество заготовок;

3. Высокая жесткость и прочность конструкции агрегата (неразъемные станины, отсутствие нажимного устройства, силу деформации заготовки воспринимают два эксцентриковых вала) позволяют развивать высокие силы деформации и получать широкий

сортамент заготовок, в том числе из крупных непрерывнолитых слябов, обеспечивая за один проход суммарную деформацию до 80%;

4. Поступательное движение рабочих бойков по замкнутой траектории, а также наличие холостых ходов, поскольку угол поворота эксцентрикового вала в период обжатия равен $\pi/2$, позволяют осуществить хороший режим охлаждения рабочего инструмента;

5. Вследствие интенсивной деформации за сравнительно короткий промежуток времени температура металла на выходе из агрегата может оставаться постоянной или повышаться по сравнению с ее уровнем на входе в бойки, что позволяет осуществить деформацию как малопластичных металлов в узком температурном интервале, так и непрерывнолитых заготовок, используя тепло литого металла.

Способ деформации полосы, реализованный в агрегате циклической деформации, может быть использован в более конструктивно простых устройствах. Наибольший интерес представляет конструкция, выполненная в виде ковочного блока с возможностью установки его в рабочую клеть прокатного стана (рис.3).

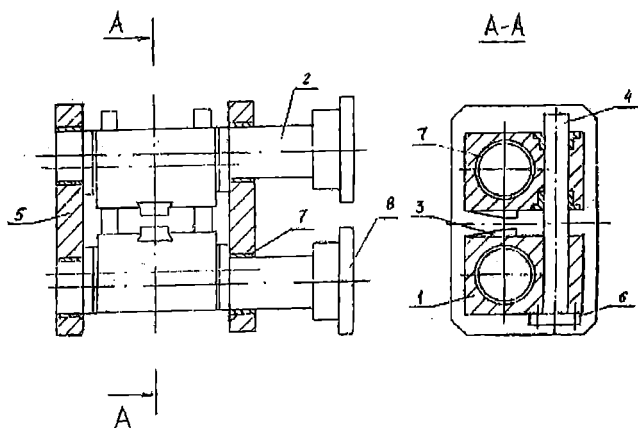


Рис.3. Ковочный блок

Упрощение конструкции и уменьшение габаритов достигается за счет исключения одного из двух эксцентриковых валов в приводе каждого бойка, что ведет к уменьшению числа шестеренных колес синхронизатора с 8 до 2, а это позволяет использовать в качестве синхронизатора стандартную шестеренную клеть прокатного стана. Установка каждого бойка на одном эксцентриковом валу позволяет уменьшить размеры устройства до размеров окна прокатной клетки, а это в свою очередь позволит использовать станину прокатной клетки и подушки валов как элементы устройства для деформирования заготовок.

Принципиальное устройство ковочного блока показано на рис. 3. Ковочный блок состоит из двух неразъемных обжим 1, двух эксцентриковых валов 2, бойков 3, прямолинейной направляющей 4, подушек 5, устанавливаемых в станину прокатного стана, элементов крепления 6, подшипников 7, соединительных муфт 8.

Условием работоспособности устройства является равенство эксцентриситетов эксцентриковых валов и расположение прямолинейной направляющей перпендикулярно осям эксцентриковых валов. При этом синхронизация вращения валов должна быть такой, что эксцентрики каждой пары противостоящих эксцентриковых валов, вращаясь навстречу друг другу, достигают своего сведенного положения одновременно. Такая синхронизация при равных эксцентриситетах обеспечивает движение противолежащих бойков по общей для обоих бойков прямолинейной направляющей, расположенной параллельно линии, соединяющей оси эксцентриситетов. На опытном заводе УралНИИЧермет спроектирован и изготовлен ковочный двухбойковый блок для установки его в рабочую клетку стана 300 для исследования технологических возможностей получения листовой продукции из плоских заготовок за один проход и в одной клетке.

Другой вариант ковочного блока с качающимися бойками показан на рис. 4. Ковочный блок содержит станину 1, эксцентриковые валы 2, 3, смонтированные в станине своими неподвижными осями на подшипниках скольжения 4. Эксцентриковые валы 2, 3 посредством муфт 5, 6 соединены с приводом, который состоит из электродвигателя и шестеренной клетки (на рисунке не показаны), обеспечивающей синхронное вращение эксцентриковых валов навстречу друг другу.

На подвижных осях эксцентриковых валов 2, 3 установлены на подшипниках скольжения 7 суппорта 8, 9. Суппорта посредством пальца 10 соединены между собой с возможностью вращения вокруг него на подшипнике 11.

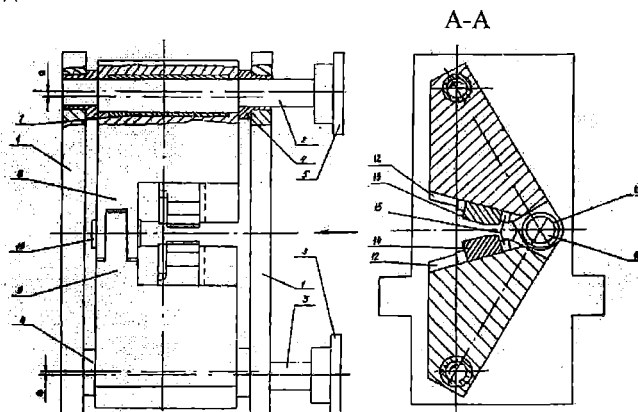


Рис.4 Прокатно-ковочный стан (ПКС)

Суппорт 8 в месте соединения выполнен в виде вилки, а суппорт 9 в виде выступа. При этом ось пальца 10 расположена на равном расстоянии от оси эксцентриковых валов 2, 3 и смещена в сторону от бойков для пропуска полосы через устройство.

При синхронном вращении эксцентриковых валов 2, 3 суппорта 8, 9 совершают плоское движение по законам движения шатуна дизоксиального кривошипно-шатунного механизма. При этом один конец шатуна – суппорта совершает движение по окружности с радиусом, равным эксцентриситету “а”, а другой – возвратно-поступательное движение по оси подачи полосы, где “е” дезаксиал. Бойки, совершая плоское движение, захватывают полосу, одновременно обжимают ее на величину Δh и подают на некоторую величину ΔS . Во время холостого хода бойки возвращаются в исходное положение, затем происходит следующий цикл деформации полосы.

Параметрические уравнения траектории любой точки бойка в прямоугольной системе координат XO_1Y в безразмерной форме имеют вид

$$\frac{x}{a} = \cos \varphi - \frac{\zeta}{b} \left(\frac{e}{a} + \sin \varphi \right) + \frac{\eta}{b} \sqrt{\left(\frac{b}{a} \right)^2 - \left(\frac{e}{a} + \sin \varphi \right)^2}, \quad (11)$$

$$\frac{y}{a} = \sin \varphi + \frac{e}{a} - \frac{\zeta}{b} \sqrt{\left(\frac{b}{a} \right)^2 - \left(\frac{e}{a} + \sin \varphi \right)^2} - \frac{\eta}{b} \left(\frac{e}{a} + \sin \varphi \right), \quad (12)$$

При работе ПКС в режиме самоподачи заготовка обжимается на величину единичного обжатия и продвигается на величину подачи:

$$\frac{\Delta h}{a} = \frac{2 \sin^2 \beta \left[\left(\frac{\Delta x_{42}}{a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y_{24}}{a} \right)^2 \right]}{|\Delta y_{24}|}, \quad (13)$$

$$\frac{\Delta S}{a} = \frac{\sin 2\beta \left[\left(\frac{\Delta x_{42}}{a} \right)^2 + \left(\frac{\Delta y_{24}}{a} \right)^2 \right]}{2 \frac{|\Delta y_{24}|}{a}}. \quad (14)$$

Проведенный кинематический анализ перемещений инструмента и обрабатываемой заготовки в зависимости от параметров привода, бойков и размеров заготовки позволяет при заданных параметрах привода выбирать параметры бойков ПКС и их расположения, соответствующие технологическим требованиям, обеспечивающим получение заготовки заданных размеров и качества при требуемой производительности.

3. Теоретическое исследование процесса циклической деформации непрерывнолитого сляба из нержавеющей стали

Существующая технология производства не обеспечивает получения непрерывнолитых слябов без поверхностных дефектов, поэтому слябы перед прокаткой на листовых станах подвергают различным видам зачистки. Для оценки напряженно-деформированного состояния металла в области очага деформации, а также для разработки рациональных режимов деформации, решена задача деформации наклонными бойками непрерывнолитого сляба с поверхностными дефектами.

Для решения задачи использован численный метод, и метод предложенный профессором Одиноквым В. И.. При исследовании процесса циклической деформации заготовки, будем пренебрегать инерционными и массовыми силами, деформируемый материал считать несжимаемым и изотропно упрочняющимся, при записи уравнений состояния использовали ассоциированный закон течения и случай простого нагружения. Рассмотрим деформацию непрерывнолитого сляба, представив его как полосу, в которой имеются дефектные образования с сопротивлением деформации в три раза больше, чем у основной массы полосы. Под дефектными образованиями понимаются элементы, в которых коэффициенты, зависящие от марки стали, увеличиваются в три раза. Оценку влияния дефектов на напряженно – деформированное состояние проводим из сравнения с результатами расчета деформации сляба, не имеющего поверхностных дефектов.

Поля напряжений σ_{ij} и скоростей V_i ($i = 1, 2, 3$) пластической деформации определяются с учетом перечисленных допущений из системы дифференциальных уравнений.

$$\sigma_{i,j} = 0; \quad \sigma_{ij} - \sigma \cdot \delta_{ij} = 2\lambda \xi_{ij}; \quad (15)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}; V_{ii} = 0; \quad (16)$$

$$\text{где } \xi_{ij} = \frac{1}{2}(V_{i,j} + V_{j,i}), \lambda = \frac{T}{H}; T = T(H, T_M, \varepsilon), H = (2\xi_{ij} \cdot \xi_{ij})^{1/2} \quad (17)$$

δ_{ij} - символ Кронекера; T_M — температура металла при деформации; σ - гидростатическое давление; ε - степень деформации; H - интенсивность скоростей деформации сдвига; T - интенсивность касательных напряжений.

Рассматривалась схема плоского деформированного состояния, из которой имеем (рис. 3.1).

$$V_3 = \xi_{33} = \xi_{13} = \xi_{23} = \sigma_{13} = 0 \quad (18)$$

Это допущение справедливо, так как ширина непрерывнолитого сляба значительно больше его высоты. Степень деформации сляба 200x1000 мм из стали 12Х18Н10Т составляла 60%.

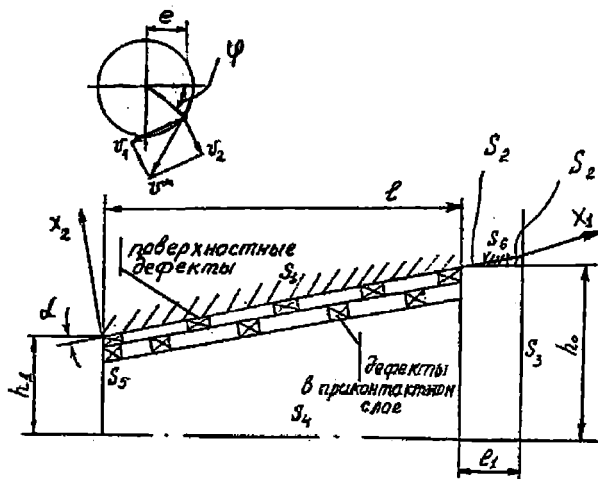


Рис.5. Расчетная схема

Расчет проводили при начальных параметрах:

$h_0 = 50$ мм — начальная высота полосы,

$h_1 = 20$ мм — конечная высота полосы,

$\alpha = 10^\circ$ — угол наклона рабочей поверхности бойка,

$e = 15$ мм — величина эксцентриситета эксцентрикового вала,

$V^* = 0,157$ м/с — скорость перемещения бойка.

Согласно расчетной схеме (см. рис. 5), граничные условия записаны в

виде

$$\begin{aligned} \sigma_{22/S_2} &= \sigma_{21/S_2} = \sigma_{11/S_3, S_5} = \sigma_{12/S_3, S_5} = \sigma_{21/S_4} = 0; \\ V_{2/S_4} &= 0; V_{2/S_5} = V_2^*; \sigma_{21/S_5} = -\Psi \tau_s \cdot (V_{ск} / V^*) \cos(n, i); \\ \sigma_{21/S_6} &= 30 \text{ МПа}, \end{aligned} \quad (19)$$

где τ_s — предел текучести материала при сдвиге; $V_{ск}$ — скорость скольжения металла относительно инструмента на поверхности S_i ; V_2^* — скорость перемещения инструмента на поверхности S_i ; V^* — окружная скорость эксцентриковых валов. Закон трения принимаем в виде

$$\sigma_{21}^* = -\Psi \tau_s \cdot (V_{ск} / V) \cos(n, i); \quad V_{ск} = V_m - V_{ин} \quad (20)$$

где $V_{ск}$ — скорость скольжения металла относительно инструмента;

V_m и $V_{ин}$ — соответственно скорости перемещения металла и инструмента вдоль оси OX_1 ;

Ψ — коэффициент, выбранный из расчета таким образом, чтобы $\max |\sigma_{21}^*| < \tau_s$; τ_s — предел текучести при сдвиге.

Модель деформируемой среды записана в виде

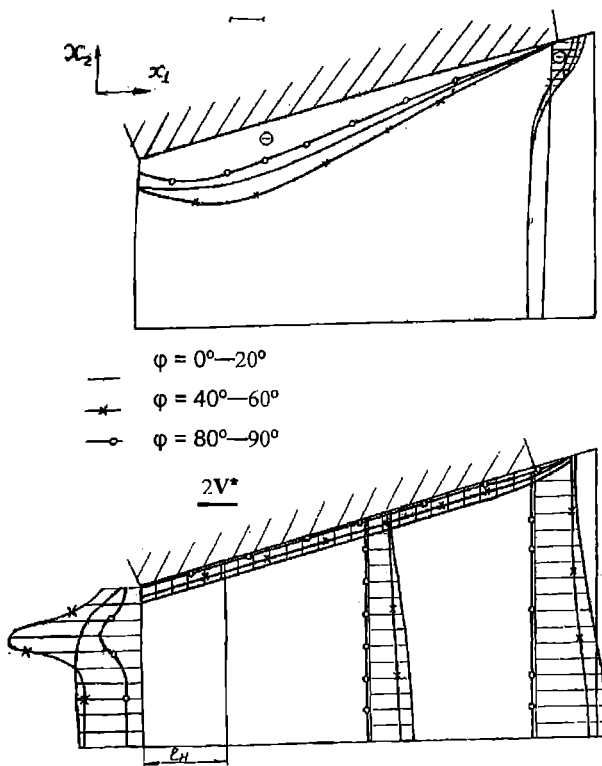
$$T = \tau_m H^p / (H^p_0 + H^p), \quad (21)$$

где $H_0 = 1 \text{ с}^{-1}$; τ_m, γ — параметры, зависящие от температуры, степени деформации и марки стали.

Исследован процесс пластической деформации сляба из нержавеющей стали при повороте эксцентриковых валов на угол $\varphi = 80^\circ$. Решение задачи осуществляли методом последовательных нагружений, при котором процесс деформации разбивался на следующие стадии:

$$0^\circ < \varphi \leq 20^\circ; 20^\circ < \varphi \leq 40^\circ; 40^\circ < \varphi \leq 60^\circ; \\ 60^\circ < \varphi \leq 80^\circ; 80^\circ < \varphi \leq 90^\circ,$$

200 МПа « σ_{ij} »



б)

Рис. 6 Эпюры напряжений $\sigma_1, \sigma_2(a)$ и скоростей $V_1, V_2(b)$ при деформации полосы с дефектами в поверхностном слое.

По результатам расчета можно сделать следующие выводы (Рис.6). На входе в очаг деформации растягивающие напряжения локализуются в слоях, контактирующих с дефектным слоем, то есть выше или ниже его. Наибольшее значение (до 290 МПа) растягивающие напряжения имеют место на поверхности сляба при повороте эксцентрика на угол φ от 40° до 80° . Под дефектным слоем растягивающее напряжение на входе значительно меньше (до 100 МПа).

Анализ траекторий движения дефектов вдоль очага деформации показал, что при наличии сжимающих напряжений на контактной поверхности, дефекты не выходят на поверхность сляба и не могут быть причиной образования поверхностных трещин и рванин.

Результаты расчета величины суммарной деформации по длине области деформирования показали, что дефектный слой деформируется, как и в случае поверхностных дефектов, значительно слабее, чем однородный металл. Но при этом необходимо отметить, что когда дефекты залегают внутри, деформация их больше, чем когда они находятся на поверхности.

Таким образом, использование установки циклической деформации в составе литейно-прокатного комплекса позволяет улучшить качество непрерывнолитых заготовок за счет интенсивной проработки центральной зоны крупных непрерывнолитых слитков, получить мелкозернистую структуры металла по всему сечению заготовки и исключить структурную неоднородность, а наличие высоких сжимающих напряжений на контактной поверхности исключает раскрытие дефектов литейной природы, а несплошности и поры в приконтактном слое завариваются.

4. Экспериментальное исследование и внедрение процессов и установок циклической деформации

Исследование процесса циклической деформации проводилось на трех созданных лабораторных площадках. Первая площадка создана в лаборатории кафедры «Механика» СИПИ-РГГПУ. Лабораторная установка циклической деформации выполнена по двух- или четырех-бойковой схеме деформации с двигателем $N=15$ кВт. Угловая скорость эксцентриковых валов $n=80$ об/мин, величина эксцентриситета эксцентриковых валов $e = 5$ мм., угол наклона рабочей поверхности бойка $\alpha = 15^\circ$. Величина самоподачи образца бойками за один цикл равна 5 мм. Деформировали алюминиевые образцы высотой 10 мм и шириной от 10 до 55 мм с шагом 5 мм. Причем величина обжатия за один проход составляла $\Delta h = 6$ мм (степень деформации $\varepsilon = 60\%$). Перед деформацией образцы нагревались в муфельной печи до температуры $T=450^\circ\text{C}$. На боковых поверхностях образцов была нанесена сетка. Аналогичные опыты проведены при комнатной температуре на свинцовых образцах высотой $h_0 = 20$ мм и шириной $B_0 = 20\div 70$ мм с шагом 10 мм. Величина обжатия за проход $\Delta h = 13$ мм ($\varepsilon = 65\%$).

Результаты исследования уширения образцов при циклической деформации алюминия и свинца представлены на рис.7. Из данных графиков следует, величина абсолютного и относительного уширения существенно зависят от ширины полосы. При величине параметра $B_0/h_0=5\div 6$, что соответствует слябу сечением $200 \times 1000\div 1200$ мм, относительное уширение составляет 3%. Полученные результаты сравнили с результатами прокатки по литературным данным. Как видно из графика, экспериментальные данные по уширению при циклической деформации практически совпадают с данными, полученными при прокатке.

Для уточнения методики расчета параметров формоизменения процесса циклической деформации провели экспериментальное исследование формоизменения заготовок прямоугольного сечения на опытном АЦД, установленном на ОЭЗ УралНИИЧермета. В качестве исходного материала использовали образцы толщиной 20 мм из горячекатанной стали марки Ст3 и образцы из непрерывнолитой заготовки, полученные на опытном МНЛЗ горизонтального типа на ОЭЗ УралНИИЧермета.

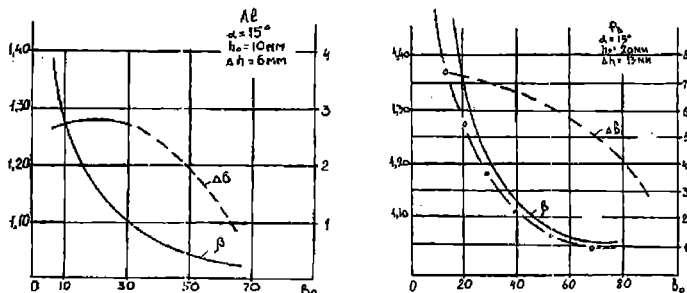


Рис.7. Влияние ширины полосы на относительное (—) и абсолютное (---) уширение в сравнении с прокаткой (—○—).

Для получения эмпирической модели рассматриваемого процесса циклической деформации, адекватно отражающую качественную и количественную стороны зависимости коэффициента уширения от степени обжатия N_0/N_1 , соотношения исходных осей полосы B_0/H_0 , угла наклона рабочей поверхности бойка α , провели исследование процесса в достаточно широком диапазоне изменения исходных параметров.

Для извлечения максимально возможной информации из полученных результатов при составлении плана эксперимента был использован полный факторный эксперимент.

После статистической обработки данных массивов были получены эмпирические зависимости величины коэффициента уширения от параметров процесса.

$$\beta = 0,914 \left(\frac{H_0}{H_1} \right)^{0,219} \cdot \left(\frac{B_0}{H_0} \right)^{-0,189} \cdot (\alpha)^{-0,147} \quad (22)$$

Коэффициент множественной корреляции $R=0,917$. Сравнение расчетного значения T - критерия с табличным (при уровне значимости 0,05) показывает адекватность выбранной модели.

Третий экспериментальный участок сдан в опытно-промышленную эксплуатацию в цехе стальных фасонных профилей Омутнинского металлургического завода. Агрегат циклической деформации (АЦД) силой 3500 кН изготовлен АО "Уралмаш", состоит из рабочей клетки и синхронизирующего редуктора с общей массой 15 т. Максимальная сила, воспринимаемая бойками, равна: 1) при деформации металла верхним и нижним бойками – 3500 кН; 2) при четырехбойковой схеме деформации – верхний и нижний бойки до 2500 кН, боковые бойки до 1000 кН. Максимальный крутящий момент, воспринимаемый одним эксцентриковым валом, – 15 кН·м. Максимальное сечение заготовки – 120x150 мм². Скорость подачи заготовки в бойки – 2 м/мин. Степень деформации за один проход – 70-80%. Электродвигатель постоянного тока мощностью 800 кВт, с регулируемой угловой скоростью вала от 0 до 300 об/мин и крутящим моментом на валу 60 кН·м. Это позволило на опытном участке получить ряд профилей простой и сложной формы и экспериментально определить производительность агрегата циклической деформации в режиме самоподачи, силу деформации $P(\varphi)$, крутящий

момент $M_{кр}$, а также коэффициент напряженного состояния Π_{σ} .

$$\Pi_{\sigma} = 0,7 + 0,24 l / H_c + 0,17 B_c / l + 0,18 S / H_1 \quad (23)$$

$$P(\varphi) = P_c B_c 0,5 (H_0 - H_1) - e [1 - 2(1 - \cos \varphi)] / \operatorname{tg} \alpha \quad (24)$$

$$M_{кр} = \begin{cases} M_d + M_{тр} & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \pi / 2 \\ M_{тр} & \text{при } \pi / 2 \leq \varphi \leq 2 \pi \end{cases} \quad (25)$$

где l - длина геометрического очага деформации; H_c B_c - средняя высота и ширина очага деформации соответственно; P_c - средняя удельная сила деформации; M_d , $M_{тр}$ - соответственно крутящий момент необходимый для деформации металла и для преодоления сил трения в подшипниках.

Величина самоподачи определяется, кроме параметров калибровки (α), величиной эксцентриситета эксцентриковых валов e , на которых укреплены бойки, еще и величиной пружины клетки Δ . За счет пружины клетки при максимально сведенном положении бойков бойки АЦД не отходят от металла в очаге деформации, а протягивают по направлению прокатки на величину:

$$\Delta S = \sqrt{e^2 - (e - \Delta / 2)^2} \quad (26)$$

При достаточно жесткой клетке АЦД этот фактор можно не учитывать при определении величины самоподачи.

Для экспериментального определения производительности АЦД в режиме самоподачи была использована заготовка из стали марки Ст20 с размерами 52х52х640х мм.

Из этой заготовки за один проход на АЦД получали балочную заготовку с размерами: ширина полок 51 мм, толщина стенки 29 мм, высота 51 мм. Размеры заготовки до и после деформации определяли штангенциркулем в холодном состоянии с точностью до 0,1 мм. Температура измерялась оптическим пирометром. Измерения проводили три раза по длине заготовки, а затем брали усредненное значение.

Цикл прокатки заготовки измерялся секундомером с точностью до 0,1 сек. Частоту вращения эксцентриковых валов определяли по тахометру.

Температура металла перед началом деформации была $T_n = 1050^\circ \text{C}$. Температура конца прокатки заготовки была $T_k = 990^\circ \text{C}$. После деформации заготовка удлинилась с $l_0 = 640$ мм до $l_1 = 816,2$ мм. Частота вращения эксцентриковых валов составляла $n = 130$ об/мин.

Параметры калибровки бойков были следующие:

Вертикальные бойки: угол наклона рабочей поверхности гребня бойка $\alpha = 15^\circ$, длина калибрующего участка – 60 мм.

Боковые бойки были плоскими, т.е. $\alpha = 0^\circ$. Величина эксцентриситета эксцентрикового вала $e = 5$ мм.

Время цикла прокатки заготовки $T_{\text{ц}} = 55$ сек.

На основании полученных экспериментальных данных можно определить основные кинематические характеристики процесса циклической деформации.

Для оценки полученных результатов на агрегате циклической деформации проведено исследование процесса деформации полос с сечением 30х70 мм², вырезанных из непрерывнолитых слябов 200х1000 мм² из стали 45 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Степень деформации за один проход составляет 60÷70%. После обжатия проведено металлографическое исследование недокатов, которое позволило оценить изменение структуры непрерывнолитого металла и поведение дефектов на поверхности и в приконтактном слое полосы.

Проведены металлографические исследования металла заготовок из стали 12Х18Н10Т и стали 45, вырезанные из непрерывнолитого слитка, после деформации на АЦД с целью выявления изменений структуры.

Деформация металла происходит по сечению заготовки неоднородно. На это указывают данные изменения микроструктуры заготовок стали по мере увеличения степени обжатия. Однако процессы, протекающие при деформации, устраняют структурную неоднородность, на что указывает микроструктура той части заготовки, которая подверглась максимальному обжатию.

Как видно, существенное увеличение степени дисперсности у стали 45 наблюдается только при степенях обжатия близких к конечной величине. Кроме того, дополнительное повышение дисперсности наблюдается в той части заготовки, которая уже не испытывает обжатия. Этот факт можно объяснить тем, что при охлаждении заготовки после деформации в металле происходят рекристаллизационные процессы, и исследуемая структура отражает структуру, которая формируется в процессе циклической деформации и в процессе охлаждения (Рис.8).

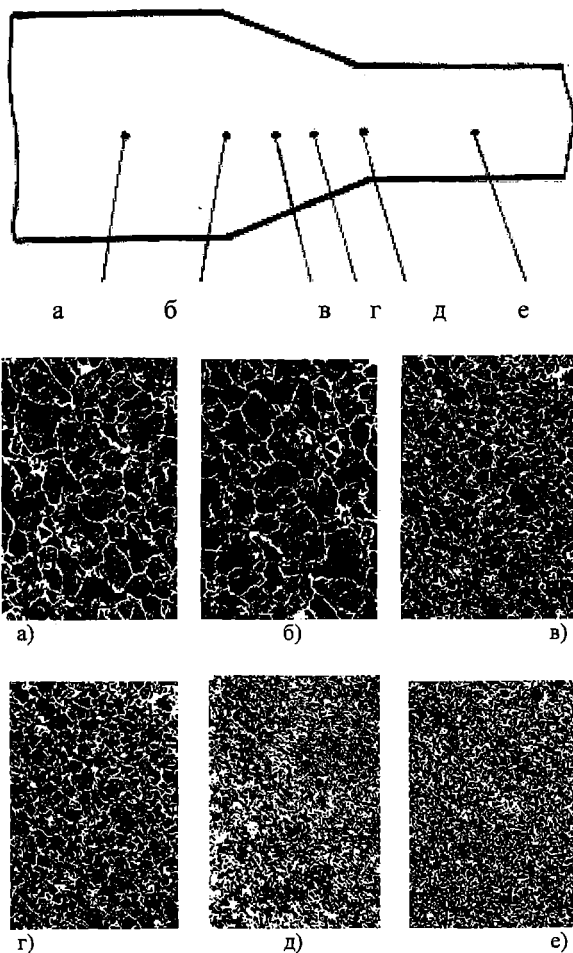


Рис.8. Изменение микроструктуры заготовки из стали 45 по мере прохождения через очаг деформации

Структура непрерывнолитой заготовки определяется условиями ее получения. Интенсивный теплоотвод через принудительно-охлаждаемый кристаллизатор приводит к образованию тонкого поверхностного слоя мелких равноосных кристаллов. Дальше вглубь слитка образуются столбчатые кристаллы на глубину 10 – 15 мм. Сквозной транскристаллизации не происходит, по-видимому, из-за того, что интервал температур кристаллизации в этих сталях невелик и составляет 30÷50° С.. В средней части слитка образуются крупные равноосные кристаллы. В целом структура является благоприятной для дальнейшей пластической деформации. Основными дефектами непрерывнолитой заготовки являются: шлаковые включения на поверхности, холодные и горячие трещины, подповерхностные пустоты и поры.

Исследование макроструктуры стали 12Х18Н10Т методом направленных секущих показало, что в литом состоянии доля зерен, ориентированных к поверхности слитка, была на 8 – 12% выше, чем зерен, равноориентированных по остальным направлениям. После пластической обработки уменьшился средний размер зерна и повысилась его равномерность. Поверхностная зона заготовки, ранее состоявшая из слоя мелких равноосных и слоя столбчатых кристаллов, после деформации и рекристаллизации превращается в зону примерно равноосных кристаллов. Размер зерна при этом несколько больше к центру заготовки, т. к. степень деформации неодинакова по ее сечению.

Частичное залечивание дефектов, касается в основном пор и пустот в поверхностной зоне, образовавшихся в процессе кристаллизации. Пустоты, не имеющие выхода на поверхность заготовки, в процессе пластической обработки завариваются практически полностью. Окружающие пору первичные карбиды не разрушаются, но несколько вытягиваются вдоль поверхности заготовки, образуя местную строчечность вблизи поверхности. Пустоты и поры замкнутые, но расположенные вблизи поверхности иногда могут раскрываться, что приводит к частичному окислению внутренней поверхности. Эти пустоты, как и частично раскрытые могут быть заварены в результате деформации. При металлографическом исследовании образцов с такими дефектами после деформации обнаружено, что они также завариваются. След от поры выявляется, как граница зерна, так как на поверхности поры имеется окисная пленка. Карбидные частицы, как и в предыдущем случае, не изменяют свою форму, но выстраиваются вдоль границы формируя местную строчечность структуры.

Таким образом, установлено, что при циклической деформации бойками непрерывного сляба, в частности из нержавеющей стали, на контактной поверхности сляба с бойками имеют место высокие сжимающие напряжения, а дефекты в приконтактном слое не выходят на поверхность сляба. При таких условиях деформации имеющиеся на слябе трещины не раскрываются, а новые поверхностные дефекты не

образуются. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что непрерывнолитой сляб из нержавеющей стали целесообразно подвергать деформации непосредственно после МНЛЗ, используя тепло литого металла, без предварительной сплошной зачистки. При этом формируется удовлетворительная структура поверхностной зоны сляба, а поры и несплошности приконтактного слоя завариваются.

Заключение

1. Разработаны, защищенные авторскими свидетельствами и патентами, процессы и установки, предназначенные для циклической деформации непрерывнолитых заготовок в узком температурном интервале, в условиях близких к всестороннему сжатию, со степенью деформации 80% и выше за один проход, со скоростью равной или выше скорости выхода слитка из кристаллизатора с целью получения заготовок для листовых, сортовых и других станов, а также для деформации малопластичных и труднодеформируемых сталей и сплавов. Новые агрегаты могут быть использованы в качестве литейно-ковочных модулей и в составе литейно-прокатных комплексов, которые позволяют сократить производственные площади, удельные капитальные и эксплуатационные расходы, снизить расход металла, энергии и топлива, улучшить качество проката.

2. Агрегат циклической деформации силой 3500 кН изготовлен Уралашзаводом и установлен на Омутнинском металлургическом заводе.

3. Проведено теоретическое исследование процесса циклической деформации бойками непрерывнолитых слябов с дефектами в поверхностных слоях. Показано, что при циклической деформации бойками непрерывнолитого сляба с дефектами в поверхностных слоях, со степенью деформации 40÷60% за один проход на контактной поверхности сляба с бойками имеют место высокие сжимающие напряжения, а дефекты в приконтактном слое не выходят на поверхность сляба, что, в конечном итоге, позволяет улучшить качество листовых заготовок и снизить потери металла.

4. Разработана методика расчета основных параметров процесса циклической деформации заготовок.

5. Проведено экспериментальное исследование формоизменения и энергосиловых параметров процесса циклической деформации заготовок, получены зависимости для расчета уширения и силы деформации.

6. Проведено исследование влияния циклической деформации на механические свойства и структуру непрерывнолитого металла. Установлено, что при степени деформации за один проход 40÷60%

дефекты литейной природы на поверхностях непрерывнолитой заготовки не раскрываются, несплошности и поры в приконтактном слое на глубине до 20 мм завариваются, и по всему сечению полосы получается мелкозернистая структура металла.

7. Агрегат циклической деформации целесообразно использовать непосредственно в линии машины непрерывного литья заготовок, что позволит использовать тепло литого металла, исключить сплошную зачистку слябов, особенно из нержавеющей стали, и существенно улучшить качество проката.

Основные публикации по теме диссертации

1. Лехов О.С., Баранов М.В., Киришин И.В., Минаков В.С., Туев М.Ю., Гладких Т.Д. Расчет основных параметров установки непрерывного литья и деформации для производства листа. Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. Межрегиональный сб. науч. тр. Магнитогорск, МГТУ, 2002, с.64-69

2. Лехов О.С., Одинокоев В.И., Гуселетов Б.П., Чуков И.Я., Туев М.Ю., Малахов А.В. Разработка технологии производства простых и сложных профилей из непрерывнолитой заготовки на агрегате циклической деформации с целью улучшения их качества Тез.докл. Всес. конф. "Металл". Абакан, 1988, с. 162-164

3. Лехов О.С., Чуков И.Я., Одинокоев В.И., Малахов А.В., Туев М.Ю. Технологические возможности новых агрегатов циклической деформации и продольной резки Тез.докл. зональной конф. "Автоматизация процессов обработки металлов давлением". Пенза, 1989, с 8-9

4. Лехов О.С., Гуселетов Б.П., Туев М.Ю., Малахов А.В., Волосков А.Д. Экспериментальное исследование формоизменения энергосиловых параметров при циклической деформации полосы прямоугольного сечения Теория машин металлург. и горного оборудования. Межвуз. сб. науч. трудов. Свердловск, 1989

5. Лехов О.С., Малахов А.В., Туев М.Ю. Оптимизация параметров очага деформации и привода агрегата циклической деформации Тез.докл. областной конф. "Современные вопросы динамики и прочности в машиностроении" Пермь, 1986, с.31-32

6. Лехов О.С., Одинокоев В.И., Чуков И.Я., Песков А.В., Гуселетов Б.П., Малахов А.В., Туев М.Ю. Исследование процесса получения заготовок простой и сложной формы на агрегате циклической деформации Тез. докл. Всес. конф. "Металл и технический прогресс" Москва, 1987, с.78 заготовок: УИФ "Наука", 1995. 184с

7. Лехов О.С., Песков А.В., Одинокоев В.И., Туев М.Ю., Каменских С.Ф., Дакалов А.Г. Исследование процесса деформации бойками непрерывнолитого сляба из нержавеющей стали с точечными дефектами в поверхностном слое. Тез.докл. Всес. конф. "Технология и средства производства заготовок деталей машин". Свердловск, 1983, с.38

8. Междунар. заявка № 90/02006 МКИ В21 В1/00, В21 9/18. Способ

и инструмент для обработки слитков/О. С. Лехов, В. И. Одинокоев, А. В. Малахов, М. Ю. Туев.

9. А.С. № 1468624 МКИ В21 В35/11 Шпиндель прокатного стана /О. С. Лехов, А. В. Малахов, М. Ю. Туев.

10. Пат. № 2063275 РФ, Прокатно-ковочный стан /М. Ю. Туев, О. С. Лехов, А.В. Малахов. Опубл. 10. 07. 96. Бюл. № 19.

11. Пат. № 9001493 Швеция, МКИ В21 5/00 В21С 37/04, В22 11/126. Способ получения заготовок из сляба и инструмент для его осуществления/О. С. Лехов, В. И. Одинокоев, А. В. Малахов, М. Ю. Туев. Опубл. 1992.

12. Лехов О.С., Киршин И.В., Туев М.Ю. Использование агрегатов циклической деформации в линиях литейно-прокатных комплексов – будущая альтернатива производства стали//Сб. науч. тр./ Под ред. Г.К. Смолина. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ин-та, 2005, Вып.1.

13. Туев М. Ю. Использование установок с высокими обжатиями циклического действия в новых технологиях производства стального проката. //Сб. науч. тр./ Под ред. Г.К. Смолина. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ин-та, 2006, Вып.3.

Подписано в печать 07.04.06. Формат 60×84×16. Бумага для множ. аппаратов. Печать плоская. Усл. печ. л. 1.2. Уч.-изд. л. 1.3. Тираж 100 экз. Заказ *1147*
Уральский государственный технический университет.

Ризограф РГТШУ. Екатеринбург. ул. Машиностроителей, 11.