

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАКРЫТИЯ ОСЕВЫХ ДЕФЕКТОВ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ПРИ ПРОКАТКЕ НА ГЛАДКОЙ БОЧКЕ И В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Скляр В. А.¹⁾ /к. т. н./, Смирнов Е. Н.¹⁾ /д. т. н./, Белевитин В. А.²⁾ /д. т. н./, Пивоваров Р. Е.¹⁾

¹⁾Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВПО "Национальный исследовательский технологический институт "МИСиС"

²⁾ФГБОУ ВО "Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет"

Наведені результати моделювання процесу прокатки безперервнолитої заготовки з дефектом макроструктури "осьова пористість". Для проведення досліджень розроблена тривимірна комп'ютерна модель прокатки безперервнолитої заготовки в гладких і каліброваних валках. Розроблена модель враховує всі основні технологічні параметри процесу, наявність дефектів у металі заготовки і може бути використана для моделювання поведінки дефектів макроструктури під час послідовної прокатки у всіх клітках обтискної групи безперервного сортового прокатного стану. На прикладі прокатки в першому проході обтискної групи безперервного сортового стану проведений порівняльний аналіз безкалібрової прокатки і прокатки в прямокутних калібрах. В ході обчислювального експерименту вивчено вплив на процес "закриття" осьової пористості таких параметрів процесу прокатки як відносне обтискання та температура прокатки. В результаті аналізу розрахункових даних отримані функціональні залежності, що дозволяють оцінити вплив керуючих факторів на величину проникнення деформації (ступеня "закриття" осьової пористості). Процедура оптимізації даних функціональних залежностей по максимальному значенню проникнення деформації дозволила визначити поєднання рекомендованих технологічних параметрів для випадку прокатки як на гладкій бочці так і в прямокутних калібрах.

Ключові слова: моделювання, прокатка, стан безперервної прокатки, гладка бочка, прямокутні калібри, безперервнолита заготовка, дефект.

The results of modeling process rolling billets with a defect of macrostructure "axial porosity" are presented. For research developed three-dimensional computer model of the rolling billets in smooth and calibrated rolls. The developed model takes into account all main process parameters, the presence of defects in the metal of the billet and can be used to model the behavior of defects of a macrostructure during of rolling in all stands of crimp group of continuous long products rolling mill. For example rolling in the first pass, the crimp group of continuous mill made a comparative analysis rolling on smooth barrel and rolling in rectangular calibers. In the computational experiment the influence on the process of closure of the axial porosity of such parameters of the rolling process as the relative deformation and the temperature of rolling. In the analysis of numerical data functional relationships are obtained, allowing to estimate influence of control factors on the degree of penetration of deformation (the degree of closure of the axial porosity). Optimization procedure of the functional dependency for the maximum value of penetration of deformation allowed us to determine the recommended combination of process parameters for the case of rolling as on a smooth barrel and rectangular calibers.

Key words: modeling, rolling, continuous rolling mill, flat pass, rectangular calibers, continuous billet, defect.

Приведены результаты моделирования процесса прокатки непрерывнолитой заготовки с дефектом макроструктуры "осевая пористость". Для проведения исследований разработана компьютерная трехмерная модель прокатки непрерывнолитой заготовки в гладких и калиброванных валках. Разработанная модель учитывает все основные технологические параметры процесса, наличие дефектов в металле заготовки и может быть использована для моделирования поведения дефектов макроструктуры во время последовательной прокатки во всех клетках обжимной группы непрерывного сортового прокатного стана. На примере прокатки в первом проходе обжимной группы непрерывного сортового стана произведен сравнительный анализ бескалибровой прокатки и прокатки в прямоугольных калибрах. В ходе вычислительного эксперимента изучено влияние на процесс "закрития" осевой пористости таких параметров процесса прокатки как относительное обжатие и температура прокатки. В результате анализа расчетных данных получены функциональные зависимости, позволяющие оценить влияние управляющих факторов на величину проникновения деформации (степени "закрития" осевой пористости). Процедура оптимизации данных функциональных зависимостей по максимальному значению проникновения деформации позволила определить сочетание рекомендуемых технологических параметров для случая прокатки как на гладкой бочке, так и в прямоугольных калибрах.

Ключевые слова: моделирование, прокатка, стан непрерывной прокатки, гладкая бочка, прямоугольные калибры, непрерывнолитая заготовка, дефект.

Введение. В условиях постоянного инновационно-технологического развития и глобализации рынков перед предприятиями, производителями металлопроката, остро стоит проблема повышения эффективности производства и обеспечения выпуска конкурентоспособной продукции, востребованного качества. В то же время, использование сортовой непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) малого сечения выявило целый ряд проблем, которые ранее не рассматривались и без решения

которых невозможно обеспечение требуемого уровня качества готовой продукции. В наибольшей степени это характерно для случаев производства сортового проката ответственного назначения из качественных конструкционных и ресурсно-пружинных марок сталей.

Цель работы. Целью настоящей работы являлась разработка математической модели и проведение исследования по выявлению особенностей поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитого

металла в процессе прокатки в первых проходах сортового стана как в случае прокатки НЛЗ на гладкой бочке, так и в случае прокатки в калибрах.

Актуальный уровень техники и исследований.

Для исследования поведения дефектов макроструктуры в процессе прокатки (и процессов обработки металлов давлением вообще) в последнее время широкое распространение получили методы математического (компьютерного) моделирования с использованием конечноэлементных программных комплексов, таких как DEFORM-3D, ABAQUS, ANSYS, QFORM, и др. При этом многообразие исследуемых процессов требует в каждом конкретном случае своего подхода к методике моделирования.

Так в работе [1] представлены результаты моделирования процессов резки и винтовой прокатки сплошных заготовок в программном комплексе Deform-3D. Изучалось влияние на глубину утяжины диаметра заготовки, угла подачи, калибровки валков обжимного стана, а также исходной формы концов заготовок.

В работе [2] проводилось математическое моделирование процесса винтовой прошивки заготовок большого диаметра. Целью работы было исследование с помощью программного комплекса Deform-3D таких параметров, как напряженно-деформированное состояние (НДС) металла, накопленная деформация по объему заготовки, характер развития деформации, энергосиловые параметры, время прошивки и т. д.

Представляет большой интерес работа [3] в которой проводилось математическое моделирование процесса деформации металла в калибрах различной формы. В ходе исследования анализировалось влияние напряженно-деформированного состояния на течение металла в различных зонах сортовых калибров в зависимости от их формы. Для проведения моделирования также использовался программный комплекс Deform-3D.

В работе [4] исследовались задачи проектирования калибровки, с целью снижения потребления энергоресурсов и уменьшения вероятности образования дефектов.

Конечно-элементные программные комплексы применяются также при моделировании износа валков [5], прокатки труб [6], имитации процесса сортовой прокатки [7], моделирования горячей прокатки металла в разгонных калибрах [8] и множества других процессов пластической деформации металла.

Постановка задачи. Дефекты НЛЗ формируются в процессе ее кристаллизации в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и могут развиваться как внутри литой заготовки, так и на ее внешней поверхности. В большинстве случаев дефекты оказывают негативное влияние на производство, вызывая отбраковку или увеличение себестоимости производства в результате необходимости приведения заготовок в соответствие с требуемыми техническими условиями перед их прокаткой.

В зависимости от причин образования дефекты можно разделить на две группы [9]:

- дефекты, специфичные для определенного ручья (встречаются только на одном ручье из-за проблем оборудования или его настроек, например, из-за дефектов кристаллизатора, нарушений вторичного охлаждения, неправильной настройки тянущих и правящих валков и др.);

- дефекты, специфичные для определенной плавки (связаны со свойствами жидкой стали и вызваны перегревом, наличием примесей, раскислением на этапе внепечной обработки стали).

Применительно к условиям производства металлопроката из НЛЗ, полученной в условиях высокоскоростных сортовых МНЛЗ с малым радиусом изгиба, усредненные цифры брака по видам имеют вид: нарушения геометрии НЛЗ – 36,4 %, дефекты макроструктуры – 17,2 %, трещины 31,9 %, шлаковые включения – 4,5 % [10]. На многих темплетах наблюдаются осевая пористость, ликвационные полосы и трещины, развитая столбчатая структура и асимметрия зон слитка.

В этой связи, вопросы, связанные с изучением поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки (усадочная раковина, газовые пузыри, осевая пористость) в процессе деформирования, имеют актуальный характер.

Данная работа выполнена в рамках гранта на проведение научно-исследовательских работ по приоритетным направлениям социально-экономического развития Белгородской области за счет средств областного бюджета Белгородской области, номер проекта – 2015.01.5.

Методика проведения исследований. Для математического моделирования поведения дефектов макроструктуры во время прокатки был выбран программный комплекс компьютерного моделирования с помощью метода конечных элементов Deform-3D.

Для получения корректных результатов моделирования процесса прокатки необходимо точное позиционирование заготовки относительно прокатных валков и учет условий трения на контакте. Также необходимо обеспечить захват заготовки валками. Это можно сделать двумя способами:

- добавить дополнительный заталкивающий объект, который помещается за заготовкой и оказывает заталкивающее усилие на ее торец;

- приложить кратковременно действующее усилие на торец заготовки, достаточное по времени, чтобы процесс захвата осуществился [11].

В качестве граничных условий задаются скорости вращения валков, ограничения степеней свободы заготовки (для обеспечения прямолинейности движения) и валков, а также коэффициент трения на поверхности контакта валок-заготовка. Прокатные валки рассматривались как жесткое недеформируемое твердое тело, а для материала заготовки использовалась упруго-пластическая модель поведения среды.

Алгоритм создания компьютерной модели процесса прокатки непрерывнолитой заготовки с дефектами макроструктуры в трехмерной постановке должен включать в себя следующие основные этапы [12]:

- 1) создание геометрической модели непрерывнолитой заготовки с дефектами и прокатных валков в CAD-программе;
- 2) импорт геометрии в программный комплекс Deform-3D;
- 3) разбиение геометрической модели на сетку конечных элементов;
- 4) задание свойств материала заготовки и ее температуры;
- 5) позиционирование заготовки и валков относительно друг друга;
- 6) создание контактных пар и определения условий на контакте;
- 7) задание граничных условий;
- 8) определение временных параметров расчета;

9) проверка и генерация базы данных, запуск на расчет.

Рассматривалось два случая: бескалибровая прокатка на гладкой бочке и прокатка в прямоугольном калибре. Материал валков – сталь, поверхность гладкая, диаметр валков 600 мм. В качестве исходной заготовки была выбрана непрерывнолитая заготовка сечением 150x150 мм, материал – сталь 40. Центральная пористость имитировалась сквозным отверстием соответствующего диаметра. Внешний вид модели приведен на рис. 1. Температура прокатки заготовки принималась равной по всему сечению заготовки. В качестве условий на контакте задавался коэффициент трения равный 0,4. Скорость прокатки – 0,1 м/с.

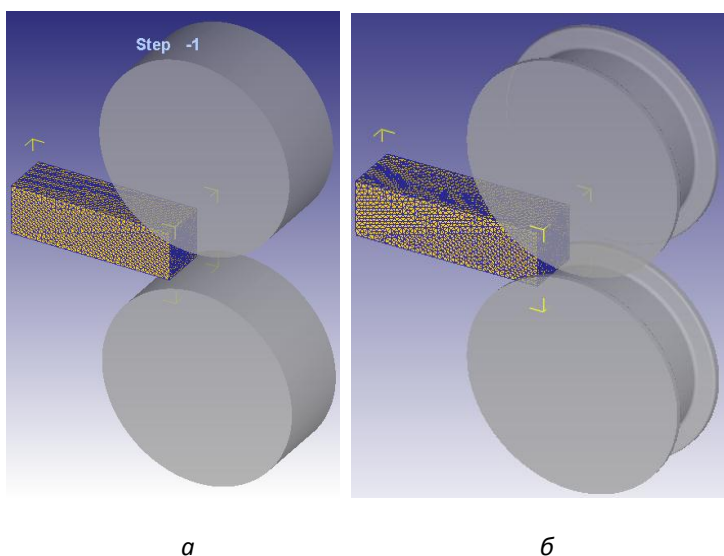


Рис. 1. Геометрическая модель прокатки непрерывнолитой заготовки с дефектами макроструктуры в гладких валках (а) и в прямоугольном калибре (б)

Результаты и их обсуждение.

В качестве выходных параметров для анализа процесса прокатки были выбраны: абсолютная высотная деформация Δh_i , интенсивность деформации ε_i , интенсивность напряжений σ_i и степень накопленной деформации Λ . Оценка эффективности процесса выкатки осевой пористости оценивалась с точки зрения максимального сокращения ее размеров и одновременного создания благоприятного НДС.

С учетом полученных предварительных результатов был выполнен вычислительный эксперимент по прокатке непрерывнолитой заготовки с дефектом осевая пористость со следующими условиями:

- размер осевой пористости 8, 6 и 4 мм;
- величина абсолютного обжатия $\Delta h_{зар} - 30, 40$ и 50 мм;
- температура прокатки $T_n - 1000, 1100$ и 1200 °С;

- рассматривалась как прокатка на гладкой бочке, так и прокатка в калибрах.

Результаты расчетов процесса прокатки в гладких валках в виде графических зависимостей представлены на рис. 2. Анализ проникновения высотной деформации Δh_v в осевую область позволяет сделать вывод о наиболее благоприятном сочетании управляющих факторов для максимального закрытия или устранения осевой пористости. Например, чтобы осевая пористость диаметром 8 мм закрылась полностью, значение Δh_v должно быть равно 4 и т. д. Анализ рис. 2, а показывает, что в случае прокатки с абсолютным обжатием 40 и 30 мм пористость закрывается не более чем на 92 и 73% соответственно (рис. 3, а). При этом наиболее благоприятной температурой начала прокатки будет температура 1100 °С. В то же время, снижение температуры до 1000° С приведет к уменьшению проникновения деформации всего на 2...4 %.

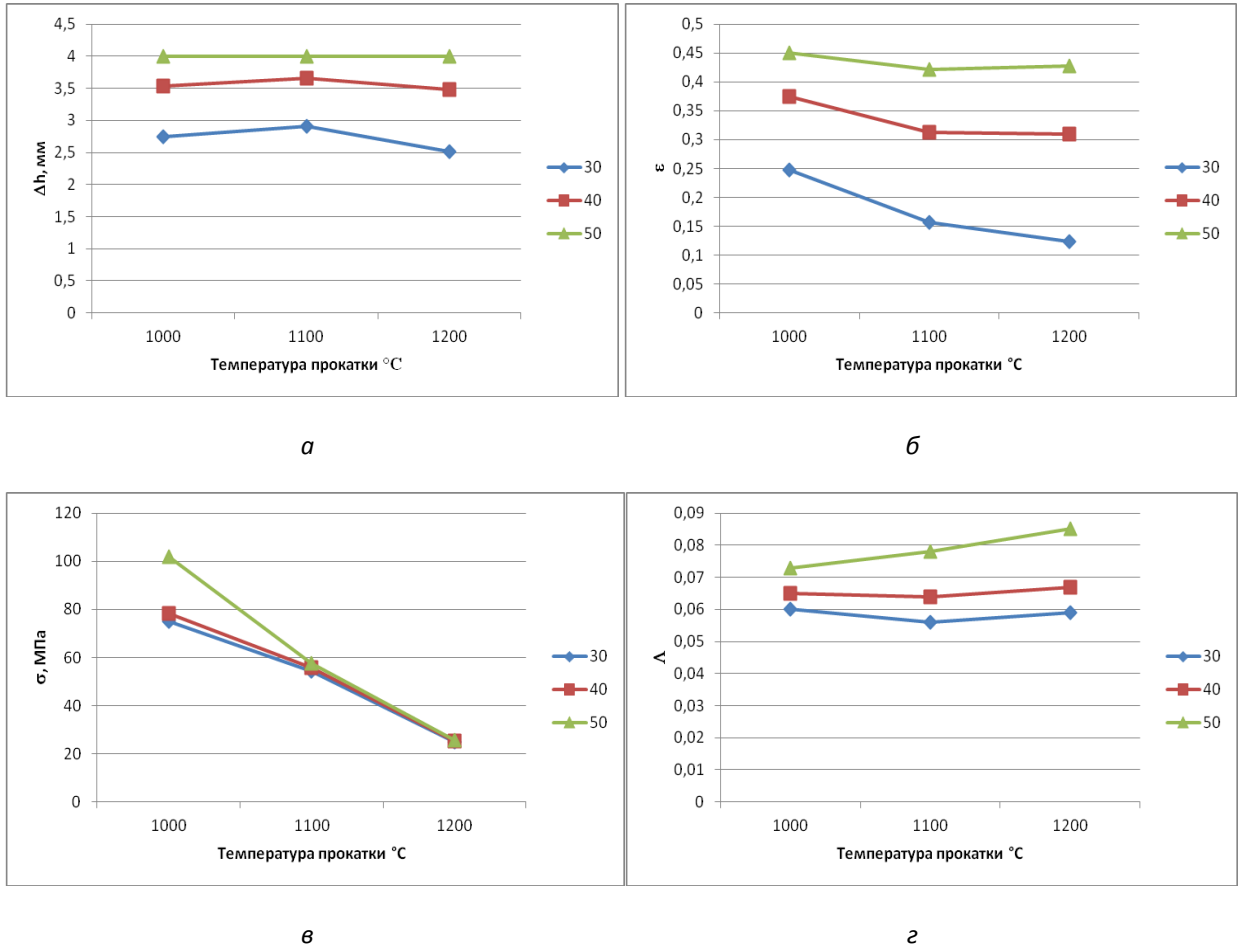


Рис. 2. Зависимости проникновения высотной деформации (а) величины интенсивности деформации (б), интенсивности напряжений (в) и накопленной степени деформации (г) от величины абсолютного обжата и температуры металла при прокатке на гладкой бочке

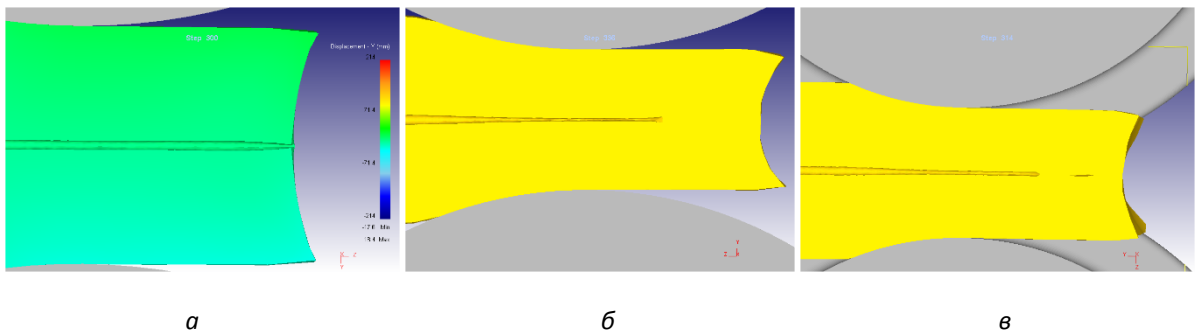


Рис. 3. Закрытие осевой пористости: а – неполное, б – полное; в – частичное с периодическими пустотами

Повышение обжатия с 30 до 40 мм приведет к увеличению проникновения деформации на 18...24 %. При абсолютном обжатии 50 мм (или относительном обжатии 33,3%) осевая пористость закрывается полностью (рис. 3, б). Однако стоит отметить, что не все промышленные станы рассчитаны на столь высокое обжатие.

Зависимость величины интенсивности деформации от управляющих факторов, приведенная на рис. 2, б также позволяет сделать вывод о степени проработки осевой зоны заготовки. Как видно из рисунка степень проработки осевой зоны будет повышаться с увеличением относительного обжатия и с понижением температуры. При этом обжатия 30 мм явно недостаточно для проработки осевой зоны, в то время как обжатия 40 и 50 мм дают уже благоприятные результаты.

Анализ напряженно-деформированного состояния позволяет оценить возможность появления дополнительных дефектов (трещин) в осевой зоне,

связанных с особенностью ее деформации – а именно появления дополнительных растягивающих напряжений, которые могут появиться при определенных условиях и вызвать разрывы. В целом наибольшее влияние на величину интенсивности напряжений на границе осевой пористости оказывает температура (рис. 2, в). При этом при температуре 1000 °С величина интенсивности напряжений подбирается к пределу прочности стали при данной температуре, что может привести к определенному риску появления трещин.

Накопленная степень деформации позволяет оценить исчерпание ресурса пластичности. Как видно из рис. 2, г накопленная степень деформации повышается с увеличением абсолютного обжатия и температуры прокатки. Однако превышения ее величины за один проход не произойдет.

Графическое отображение результатов расчетов в случае прокатки в прямоугольных калибрах для последующего анализа представлены на рис. 4.

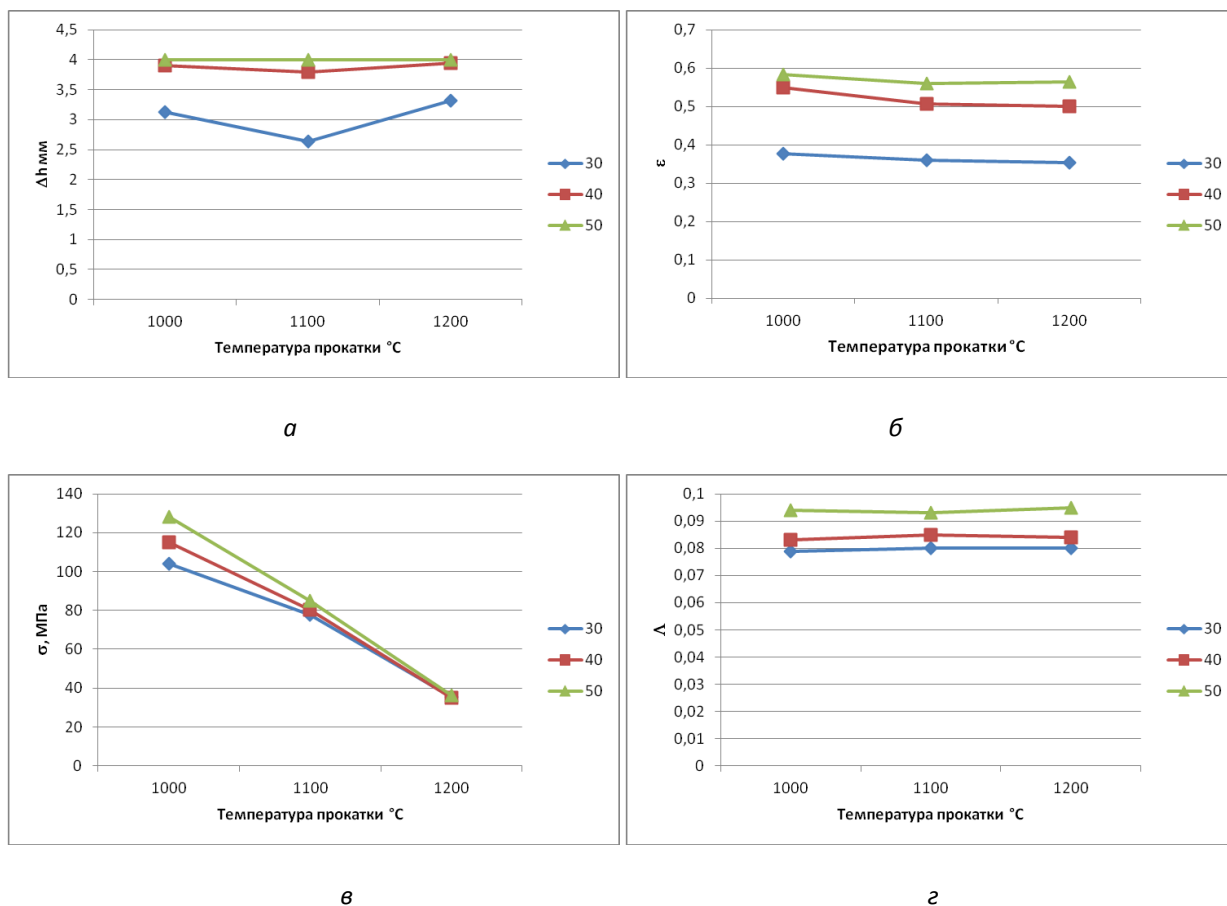


Рис. 4. Зависимости проникновения высотной деформации (а) величины интенсивности деформации (б), интенсивности напряжений (в) и накопленной степени деформации (г) от величины абсолютного обжатия и температуры металла при прокатке на гладкой бочке

Анализ проникновения высотной деформации (рис. 4, а) в целом показал большую величину проникновения деформации, чем при прокатке на гладкой бочке в среднем на 9...24%. Причем немаловажным следует считать факт, что в случае прокатки в прямоугольных калибрах осевая пористость закрывается уже при величине абсолютного обжатия 40 мм, однако характер этого закрытия неравномерный по длине заготовки, т.е. в определенных местах могут встречаться пустоты (рис. 3, в).

При абсолютном обжатии 50 мм осевая пористость, как и в случае прокатки на гладкой бочке полностью закрывается. Влияние температуры нагрева на проникновение деформации менее ярко выражено. Для случая абсолютного обжатия 30 мм наилучшее проникновение наблюдается при температуре 1200 °С.

Характер зависимости величины интенсивности деформации от управляющих факторов (рис. 4, б) аналогичен такой же зависимости и для случая прокатки в гладких валках. Но в целом величина интенсивности деформации на 23...65 % больше при прокатке в калибрах. Как и для случая прокатки в гладких валках наилучшая степень проработки наблюдается при величинах абсолютного обжатия 40 и 50 мм.

Величина интенсивности напряжений (рис. 4, в) при прокатке в прямоугольных калибрах также больше 20...32 % чем при прокатке на гладкой бочке, что объясняется дополнительным влиянием боковых стенок калибра и сокращением уширения.

Анализ зависимости накопленной степени деформации от управляющих факторов (рис. 4, г) позволяет сделать вывод, что, в отличие от случая прокатки в гладких валках, температура практически не влияет на величину накопленной степени деформации, а с ростом абсолютного обжатия накопленная степень деформации увеличивается. В целом значения накопленной степени деформации при прокатке в прямоугольных калибрах на 11...30% больше чем при прокатке в гладких валках.

Проведенное моделирование прокатки заготовок с размерами осевой пористости 6 и 4 мм показало, что уже при величине обжатия 30 мм в случае наличия осевой пористости 6 мм происходит ее закрытие на 87...91% а осевая пористость 4 мм закрывается полностью. Поэтому детальный анализ прокатки заготовок с данным размером осевой пористости не производился.

Проведенный регрессионный анализ позволил получить прогнозные модели зависимостей проникновения обжатия от управляющих факторов:

- для случая прокатки на гладкой бочке ($R^2 = 0,99$):

$$\Delta h_{\text{в}} = 16,2878 + 0,1551 \cdot \Delta h_{\text{заг}} + 0,0288 \cdot T_{\text{п}} - 0,00193 \cdot \Delta h_{\text{заг}}^2 + 0,000058 \cdot \Delta h_{\text{заг}} \cdot T_{\text{п}} \quad (1)$$

- для случая прокатки на гладкой бочке ($R^2 = 0,73$):

$$\Delta h_{\text{в}} = 21,63667 + 0,39967 \cdot \Delta h_{\text{заг}} + 0,049283 \cdot T_{\text{п}} - 0,0037 \cdot \Delta h_{\text{заг}}^2 - 0,00005 \cdot \Delta h_{\text{заг}} \cdot T_{\text{п}} \quad (2)$$

Процедура оптимизации данных функций по максимальному значению проникновения деформации позволила определить рекомендуемые параметры: для случая прокатки на гладкой бочке $\Delta h_{\text{заг}} = 45,7$ мм ($\varepsilon = 30,5\%$), $T_{\text{п}} = 1096$ °С, $\Delta h_{\text{заг}} = 42$ мм ($\varepsilon = 28,0\%$), $T_{\text{п}} = 1000$ °С.

В то же время отмечалось, что не все прокатные станы могут выдержать такое абсолютное обжатие, поэтому была выполнена процедура оптимизации и для других значений абсолютного обжатия, т.е. задано ограничение по его величине. Было установлено, что наилучшее проникновение обжатия в случае прокатки на гладкой бочке можно получить путем подбора температуры прокатки исходя из зависимости:

$$T_{\text{п}} = 1008,48 + 281,5 \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

а, в случае прокатки в калибрах наилучшего эффекта при относительном обжатии $\varepsilon < 26,7$ можно добиться при прокатке с температурой 1200 °С.

Выводы

Разработана методика математического (компьютерного) моделирования поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовке в процессе прокатки. Показано, что предложенный подход к учету наличия дефектов макроструктуры правомочен и позволяет получать достаточный объем информации. Установлено, что в случае прокатки на гладкой бочке максимального закрытия осевой пористости можно добиться путем сочетания управляющих факторов: относительное обжатие $\varepsilon = 30,5\%$, температура прокатки $T_{\text{п}} = 1096$ °С. Получена так же зависимость, которая позволяет определить требуемую температуру прокатки (регулируется температурой нагрева) в зависимости от максимально возможной степени обжатия в первом проходе. В случае же прокатки в калибрах установлено что степень проникновения деформации и проработки осевой зоны больше чем при прокатке на гладкой бочке, а максимального закрытия осевой пористости можно добиться путем сочетания управляющих факторов: относительное обжатие $\varepsilon = 28,0\%$, температура прокатки $T_{\text{п}} = 1000$ °С. Вести прокатку заготовок с меньшим обжатием с точки зрения лучшей проработки структуры рекомендуется при максимальной температуре $T_{\text{п}} = 1200$ °С.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Исследование нестационарной стадии винтовой прокатки непрерывнолитых заготовок на трехвалковом обжимном стане / Ю. В. Бодров, Д. В. Овчинников, В. И. Устьянцев, А. А. Богатов // Труды XVII международной научно-технической конференции "ТРУБЫ – 2009". – 2009. – С. 287 – 288.
2. Романенко В. П. Моделирование процесса винтовой прошивки заготовок большого диаметра в двухвалковом стане методом конечных элементов / В. П. Романенко, Д. В. Сизов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2011. – С. 36 – 40.
3. Кадыков В. Н. Моделирование процессов формоизменения дефектов при прокатке в калибрах / В. Н. Кадыков, А. А. Уманский, Ю. А. Мартыанов // Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Сборник трудов всероссийской научно-практической конференции. – Новокузнецк, 2011. – С. 146 – 151.
4. Кинзин Р. И. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки / Р. И. Кинзин, С. С. Рычков // Вестник МГТУ им. Носова. – 2011. – С. 45 – 48.
5. Рычков Сергей Сергеевич, Кинзин Дмитрий Иванович Моделирование износа валков методом конечных элементов при прокатке в калибрах простой формы // Калибровочное бюро. 2013. №1 С. 29-42.
6. Пенкин А. В. Расчет величины истинной деформации при поперечно-винтовой прокатке: моделирование методом конечных элементов // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 2013. №26 (124) С.169-175.
7. Дёмин Д.О., Лабутина Т.М., Захарьев И.Ю. Имитационное моделирование процесса прокатки прутка круглого сечения на гладкой бочке // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016. №19 С.168-174.
8. Коренко М. Г. Математическое моделирование напряженно деформированного состояния металла при горячей прокатке в разгонных калибрах // ВЕЖПТ. 2011. №7 (52) С.36-40.
9. Ботников С. А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла / С. А. Ботников. – Волгоград, 2011. – 97 с.
10. Качество непрерывнолитых заготовок / П. О. Быков, Г. М. Никитин, Р. И. Сержанов [и др.] // Труды Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана", 6–7 декабря 2007 г. –Караганда, 2007. – С. 379 – 383.
11. Шляпугин А. Д. Моделирование и оптимизация технологических процессов ОМД / Д. А. Шляпугин. – Самара, 2010. – 46 с.
12. Скляр В.А. Смирнов Е.Н. Конечно-разностные методы в обработке металлов давлением. Конспект лекций для обучающихся по направлению 22.04.02 "Металлургия". - Старый Оскол: СТИ НИТУ "МИСиС", 2016 г. - 68 с.