

УДК 621.771.014.2:665.765
МРНТИ 53.43.03
<https://doi.org/10.31643/2018/6445.8>

Комплексное использование
минерального сырья. № 2. 2018.

С. А. МАШЕКОВ¹, Л. Р. КИЯНБЕКОВА², А. С. МАШЕКОВА³, Р. Е. УРАЗБАЕВА^{2*}

¹Казахский национальный исследовательский технический университет *e-mail: raushjan@mail.ru
имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

²Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова,
Бишкек, Кыргызстан

³Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛОС ПРИ ПРОКАТКЕ В МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПРОДОЛЬНО-КЛИНОВОМ СТАНЕ

Received: 27 March 2018 / Peer reviewed: 15 May 2018 / Accepted: 23 May 2018

Резюме. В работе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки при прокатке в продольно-клиновом стане (ПКС). Методом конечных элементов и программой MSC Super Forge получены количественные данные и установлены основные закономерности распределения НДС, температуры при прокатке заготовок в продольно-клиновом стане с различными единичными обжатиями. Для определения предельной пластичности проведено испытание образцов на пластометре STD 812. Данный пластометр позволяет испытывать образцы кручением, растяжением и сжатием при температурах до 1500 °С. Испытание реализуется при непрерывном или дробном обжатии с заданной степенью и скоростью деформации на каждом проходе. Пластометр оснащен блоком управления и компьютерной программой, которые позволяют автоматически выдавать кривые сопротивления деформации металлов и сплавов. Установлено, что сталь 08кп характеризуется достаточно высоким уровнем предельной пластичности и имеет широкий диапазон удовлетворительной деформируемости. В статье установлено, что с ростом температуры испытания наблюдается повышение значения предельной пластичности при рассмотренных скоростях деформации и прокатка полос из стали 08кп в продольно-клиновом стане осуществляется без нарушения сплошности материала заготовки. Показано, что прокатка в многофункциональном ПКС приводит к локализации интенсивности напряжений и деформации в начальном этапе прокатки в зонах захвата заготовки валком, а на последующих этапах участки сосредоточения интенсивности напряжений и деформаций постепенно переносятся от центральных слоев к поверхностным зонам и краям заготовки. Постепенный перенос интенсивности напряжений и деформации от центра к краям и поверхности заготовки позволяет путем подбора рациональных деформационных режимов прокатки получать высококачественные полосы с мелкозернистой структурой.

Ключевые слова: прокатка, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, интенсивность напряжений и деформаций, пластичность

Введение. В настоящее время для производства тонких листов из стали используют сложную, энергоемкую технологию, состоящую из разлива слэба – горячей прокатки – принудительного охлаждения на отводящем рольганге – очистки от окалины – холодной прокатки – дрессировки – отделки [1]. Каждый этап технологического процесса прокатки тонких листов осуществляется в отдельном цехе крупного металлургического предприятия.

Одним из важнейших и перспективных направлений изготовления тонких листов из сталей и сплавов является создание литейно-прокатных комплексов (ЛПК), включающих в свой состав

машины непрерывного литья полос и агрегаты для прокатки непрерывно-литых полос [2–8]. Низкие удельные капиталовложения и короткий строительный цикл; простая и компактная технология; региональное сырье в виде металлического лома; специализированный сортament продукции, ориентированный на конкретного потребителя; высокая производительность труда при оптимизации производственных издержек; появление новых технологий; а также создание нового технологического оборудования – весь этот комплекс объективных предпосылок сделал ЛПК одним из наиболее динамично развивающихся и

эффективных направлений в металлургии [9].

По мнению некоторых исследователей, в составе ЛПК для получения листа можно использовать полосовые станы. Так в работе [10] отмечена перспективность использования в составе ЛПА планетарных станов конструкций Круппа-Платцера или фирмы «Сендземир». При прокатке нагретых полос степень деформации на этих станах за один проход составляет 90–98 %. Стан фирмы «Сендземир» состоит из двух неподвижных опорных валков, вокруг которых вращаются соответствующие промежуточные и рабочие валки. Рабочие и промежуточные валки расположены в приводных и синхронно вращающихся в противоположных направлениях обоймах и могут смещаться в радиальном направлении. Они вращаются по типу сателлитных шестерен вокруг опорного валка. При горячей прокатке пара подающих валков медленно вводит нагретый сляб в зазор между валками планетарной клетки. При этом каждая отдельная пара быстровращающихся рабочих валков прокатывает тонкий сляб в участок готовой плоскопараллельной полосы.

В работе [11] отмечается, что за последнее время увеличился спрос на мини-станы горячей прокатки, которые могут производить горячекатаные рулонные листы в небольшом объеме, и требуют малых капитальных вложений. Примером мини-стана может служить стан, состоящий из реверсивного черного и чистового блока (стан Стеккеля). Такие станы прокатывают непрерывнолитые слябы толщиной 120–220 мм. Моталки в нагревательных печах располагаются с передней и задней сторон стана Стеккеля, который может обеспечить требуемое обжатие с минимальными потерями тепла от прокатываемого металла. Стан Стеккеля обычно применяют для производства в малых объемах полосы из нержавеющей стали в рулонах, т.е. их не используют при листовой прокатке сталей и сплавов.

Одноклетьевые станы очень разнообразны по конструкциям и размерам [5]. В черной металлургии наиболее часто применяются реверсивные шестивалковые станы и станы с 20-валковыми клетями. Данные станы применяются главным образом для прокатки тонких и тончайших полос и лент в рулонах из легированных сталей и сплавов.

По мере освоения производства тонких полос из сталей и сплавов на существующих станах специалисты по управлению качеством все чаще стали обращать внимание на дефекты поверхности изделий [12], которые в свою очередь зависят от структуры сплава [13]. Наличие дефектов снижает производительность труда, коэффициент использования металла, качество изделий,

увеличивает трудоемкость производства, т.е. ухудшает технико-экономические показатели производства. Кроме того, наличие дефектов на продукции снижает ее конкурентные преимущества, ограничивает динамику экспансии на внешнем рынке и снижает международный рейтинг производителей тонких полос.

Современные тенденции в развитии специализированного оборудования для прокатки листов и лент предполагают максимальное возможное упрощение конструкций прокатных станов с одновременным повышением качества готовой металлопродукции [12]. При этом, в случае использования прокатных станов в малых предприятиях с малым объемом и большим сортаментом производства, необходимо обеспечить возможность максимальной гибкости настройки процесса прокатки и реализовать листовую прокатку. И одним из главных требований к разработке нового оборудования является возможность модернизации уже имеющихся клетей прокатных станов с целью минимизации затрат.

Для получения тонких листов очень важными является точность геометрических размеров, планшетность, продольная и поперечная разнотолщинность. Наиболее простой способ повышения точности геометрических размеров металлопроката является уменьшение диаметров рабочих валков, что ведет к снижению силы прокатки, что благоприятно сказывается на конечном продукте [14]. Но, зачастую, снижение диаметров рабочих валков невозможно или ограничено вследствие конструктивных особенностей станины прокатного стана, а также тем, что при уменьшении диаметра валков увеличивается прогиб валка и уменьшается прочность валкового узла. При малых диаметрах рабочих валков уменьшение прогиба валков можно достичь, используя опорные валки большого диаметра, что и использовали при проектировании клетей кварто- и многовалковых клетей станов холодной прокатки. Однако, учитывая, что уменьшения размеров рабочих валков до величин, которые не позволяют использовать рабочие валки в качестве приводных, привод организовывался на опорные валки. В таком случае наиболее предпочтительным является использование клетей кварто- типа. Это связано с простотой конструкции данных клетей. Однако, использование таких клетей приводит к некоторым проблемам, которые требуют изучения.

В настоящее время известны различные схемы прокатки через опорные валки [12]. Наиболее применяемыми двенадцати- и двадцативалковые станы, привод которых

осуществлялся через опорные валки. Однако, при прокатке в данных станах происходит изгиб валков в горизонтальной плоскости, что отрицательно влияет на качество готовой продукции. Поэтому исследователями постоянно ведутся работы по созданию таких конструкций клетей, которые бы позволили применять рабочие валки малого диаметра и иметь высокую жесткость при более простой валковой системе. Примером могут служить станы кварто- типа МКВ, уже освоенные в промышленности [4]. Для предотвращения прогиба рабочих валков малого диаметра в горизонтальной плоскости служат опорные ролики; они могут иметь двухстороннее расположение. Приводными в станах МКВ являются опорные валки.

Таким образом, одной из причин снижения качества является отсутствие подпора рабочих валков вдоль оси прокатки в многовалковых клетях [14]. Отсутствие подпора является причиной изгиба валков в горизонтальной плоскости, отрицательно влияющего на качество готовой продукции. Другой причиной является наличие выталкивающей силы вследствие того, что от передаваемого момента на рабочий валок действует окружная сила, направленная вдоль линии прокатки. Также интерес вызывает процесс передачи крутящего момента посредством трения между валками, а точнее то, на сколько велики потери и какой максимальный момент возможно передать, что также накладывает некоторые ограничения на возможность организации прокатки с приводом на опорные валки.

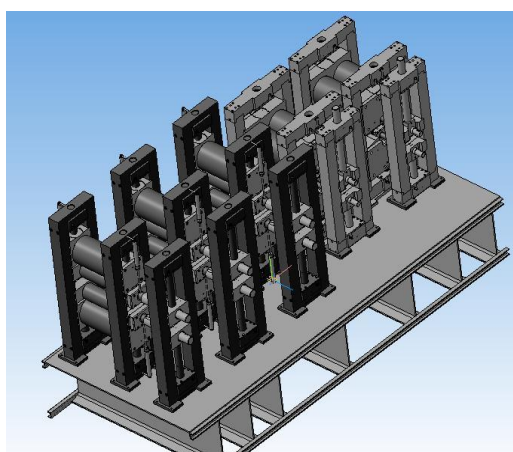
На данный момент на предприятиях стран СНГ, выпускающих листовую продукцию в малых

объемах, наблюдается тенденция к закупке импортного оборудования (в частности Итальянского, Турецкого, Финского и Германского производства), либо подобные предприятия становятся не рентабельными, так как приходится продавать металлопродукцию по заниженным ценам или просто теряют своих покупателей на рынке из-за невозможности предложить листы и полосы достаточно высокого качества [14]. Поэтому в этом аспекте очень остро стоит вопрос развития многофункциональных станов холодной и горячей прокатки.

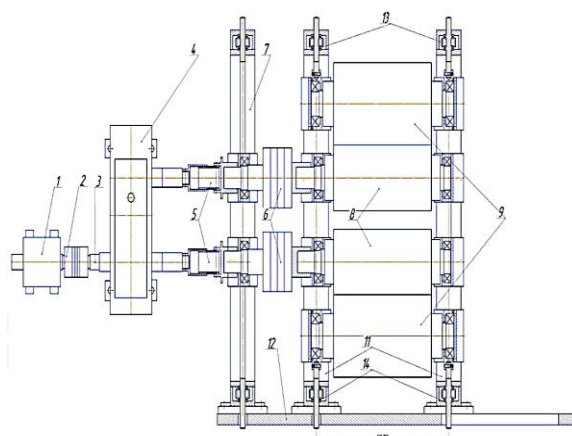
Если взять и проанализировать оборудование зарубежных производителей [14], то можно увидеть тенденцию того, что все закупаемое оборудование полистовой прокатки изготавливается специфической конфигурации с расчетом на то, что запасные части и комплектующие, вследствие очень большой сложности или невозможности их изготовления сторонними предприятиями, будут закупаться у того же завода-изготовителя, и часто так и происходит, но сами комплектующие закупаются в большинстве случаев по завышенным ценам.

На основе вышесказанного можно сделать заключение, что в настоящее время очень остро стоит вопрос развития многофункциональных станов холодной и горячей прокатки, позволяющих производить листовой прокат из металлов и сплавов высокого качества.

Для прокатки листов из сталей и сплавов нами предложен многофункциональный продольно-клиновый стан (ПКС) новой конструкции (рисунок 1) [15, 16].



а



б

- 1 – мотор-редуктор; 2 – муфта; 3 – вал; 4 – шестеренная клетя; 5 и 6 – шпиндели; 7 – подшипниковая клетя; 8 – рабочие валки ($D_{P1}=180$ мм, $D_{P2}=150$ мм, $D_{P3}=125$ мм, $D_{P4}=106$ мм, $D_{P5}=94$ мм); 9 – опорные валки ($D_{Op}=220$ мм); 11 – станина; 12 – опорная плита; 13 и 14 – нажимные механизмы

Рисунок 1 – Многофункциональный продольно-клиновый стан (а) и конструкция его рабочих клетей (б)

Данный стан содержит электродвигатели, редукторы, шестеренные клетки, универсальные шпиндели, муфты, клетки с рабочими и опорными валками. При этом в первых трех клетях установлены два, а в последних двух клетях – четыре опорных валка. Вращение уменьшающихся в направлении прокатки рабочих валков осуществляется через подшипниковые клетки пятью мотор-редукторами с угловой скоростью:

$$\omega = v \cdot R$$

где v – скорость прокатки в каждой клетке стана;
 R – радиус рабочих валков в каждой клетке стана.

При этом расстояния между клетями увеличены на величину опережения, а регулировку расстояния между рабочими валками производят единими червячными нажимными механизмами, расположенными сверху и снизу станин стана и подшипниковых клеток.

Необходимо отметить, что рабочие валки в каждой клетке имеют постоянный диаметр, а в последовательно расположенных клетях диаметр данных валков уменьшается в направлении прокатки. На выходе осуществляется разрезка тонкой полосы.

В работе [17] представлен анализ результатов математического моделирования упругой деформации тяжело нагруженных элементов клеток нового стана с использованием метода конечных элементов и деформационной модели прочности металла. Определено влияние изменения диаметра рабочих валков ПКС на упругую деформацию тяжело нагруженных элементов клеток стана. Показано, что новый стан имеет достаточно высокую жесткость конструкции клеток и удовлетворяют условию прочности. Отмечено, что прокатка полос на предлагаемом стане не приведет к получению готового проката с продольной и поперечной разнотолщиной. В результате моделирования упругой деформации тяжело нагруженных элементов клеток нового стана разработаны мероприятия по их модернизации.

Экспериментальная часть. *Материалы и методика эксперимента.* Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) при прокатке заготовок в многофункциональном продольно-клиновом стане использовали специализированную стандартную программу MSC Super Forge [18, 19]. Трехмерная

геометрическая модель прокатываемого листа и деформируемого инструмента была построена в САД программе Inventor, и импортирована в САЕ программу MSC Super Forge. При создании конечно-элементной модели исходной заготовки и инструмента, был использован трехмерный объемный элемент STETRA (четырёхузловой тетраэдр) применяемый для моделирования трехмерных тел.

Следует отметить, что для расчета НДС использовали техническую характеристику рабочих клеток предлагаемого стана. В MSC Super Forge инструменты принимаются абсолютно жесткими и обеспечивают только свойства теплопроводности и теплопередачи, а механические свойства игнорируются. Из базы данных материалов назначили материал инструмента ШХ15. Для этого материала плотность и тепловые свойства программа назначила по умолчанию.

Для исследования процесса прокатки в ПКС использовали заготовку из стали 08кп размером 5×20×50 мм. Из базы данных программного комплекса MSC Super Forge задавали реологические свойства стали 08кп при температуре 900 °С. При этом материал заготовки принимали изотропным упругопластическим с нелинейным упрочнением (BISO).

Взаимодействие между жесткими валками и деформируемым материалом заготовки моделируется с помощью контактных поверхностей, которые описывают контактные условия между поверхностями валков и поверхностью прокатываемого листа. В процессе моделирования контактные условия постоянно обновляются, отражая вращение валков и деформацию материала, что позволяет моделировать скольжение между валком и материалом обрабатываемой заготовки. Контакт между валком и листом смоделирован трением по Кулону, коэффициент трения был принят 0,3 [1].

Температурный режим при прокатке состоит из обмена тепла между валками, листом и окружающей средой, а также из теплового эффекта за счет деформации металла. Процесс прокатки проходит при комнатной температуре, поэтому начальную температуру валков приняли равной 20°С.

Запускали программу MSC Super Forge. Шаговым методом рассчитывали компоненты тензора деформации (ϵ), компоненты тензора скорости деформации ($\dot{\epsilon}$), компоненты тензора напряжения (σ), интенсивность деформаций (Γ),

интенсивность напряжений (T_i), распределение температур по объему заготовки.

В работе произвели расчет степени использования ресурса пластичности (СИРП) при прокатке тонких полос.

Условие разрушения стали и сплавов при прокатке можно оценить по величине СИРП [20]:

$$\psi = \int_0^t \frac{H(\tau)d\tau}{\Lambda_p [k_{жс}(\tau)]} = \int_0^\varepsilon \frac{H(\varepsilon)d\varepsilon}{\Lambda_p [k_{жс}(\varepsilon)]},$$

где Λ_p – предельная пластичность металла, зависящей от напряженного состояния;

H – интенсивность скоростей деформаций сдвига;

$k_{жс} = \sigma/T$ – коэффициент жесткости схемы напряженного состояния;

T – интенсивность касательного напряжения;

σ – среднее напряжение.

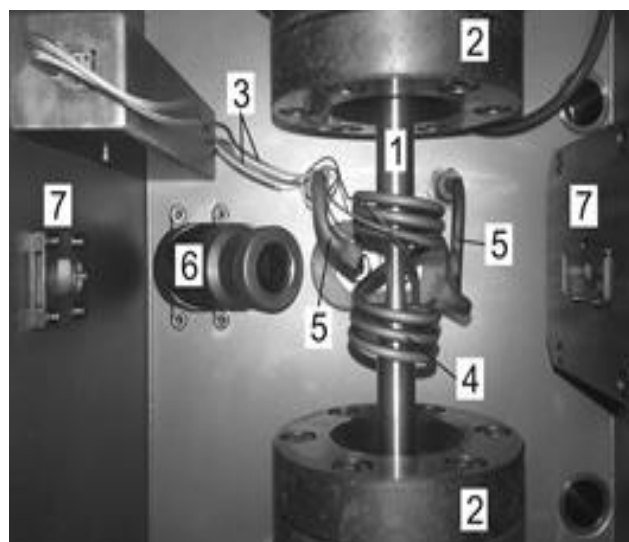
Для расчета H , T , σ использовали теоретические данные полученные по вышеприведенной методике, а для определения Λ_p провели пластометрические испытания образцов на пластометре STD 812 (рисунок 2а) [21]. Данный пластометр позволяет испытывать образцы при температурах до 1500 °С со скоростью нагрева и охлаждения до 100 К/сек,

при скоростях деформации до 50 с⁻¹ при кручении и до 1,0 с⁻¹ при растяжении и сжатии, степенях деформации – до 0,7 при сжатии, до 0,4 при растяжении и до 10,8 при кручении. В процессе испытания реализуется непрерывное или дробное кручение с заданной степенью и скоростью деформации на каждом проходе. Пластометр оснащен блоком управления и компьютерной программой, которые позволяют автоматически выдавать кривые сопротивления деформации металлов и сплавов.

Нагрев осуществляется в электропечи или индукторе, среда нагрева и испытания – воздух, аргон, вакуум (10⁻⁴ МПа). Температура образца до испытания, во время и после испытания задается по любому реальному закону, как функция от времени. Предусмотрена закалка образца в воде, в том числе и мгновенная. Скручивающий пластометр позволяет определять характеристики пластичности материалов с учетом изменения температуры и скорости деформации, неравномерности деформации по длине и сечению образца. Благодаря этому является возможным проведение обобщенной процедуры определения пластических характеристик при кручении при повышенных температурах. Испытания проводились в вакууме при постоянной скорости повышения температуры деформации.



а



б

1 – образец, 2 – держатели, 3 – термопара типа К, 4 – электромагнитный индукционный нагреватель, 5 – система охлаждения форсунки, 6 – пирометр, 7 – лазерные датчики для измерения диаметра образца

Рисунок 2 – Торсионный пластометр STD 812 (а) и расположение образца в камере (б)

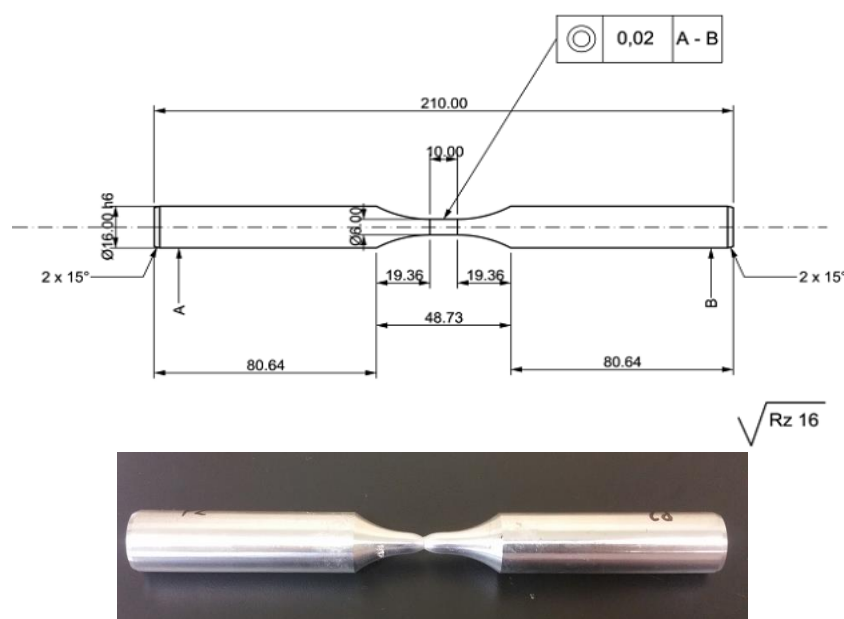


Рисунок 3 – Цилиндрические образцы

Для проведения экспериментов использовали цилиндрические образцы диаметром $d = 6$ мм и с базовой длиной $l = 10$ мм (рисунок 3), а для измерения и контроля изменений температуры применяли термопару типа K (NiCr-Ni). Термопара типа K сваривалась с боковой поверхностью образцов. Образцы в индукционном нагревателе нагревали до температур 500, 700, 900 и 1100 °С при постоянной скорости 5 °С/с, выдерживали при этих температурах в течение 10 с и деформировали кручением, растяжением, сжатием и скручивающим растяжением со скоростью деформации 1,0 с⁻¹. После деформации образцы охлаждали со скоростью 20 °/с. Общий вид расположения образца в аппарате представлен на рисунке 2б.

Для определения степени деформации сдвига до разрушения при торсионных испытаниях на кручение использовали следующее уравнение (1) [22]:

$$\Lambda_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot N}{\sqrt{3} \cdot L}; \quad (1)$$

где: R – радиус образца;

L – длина образца;

N – количество скручиваний (оборотов) образца.

При кручении цилиндрических образцов показатель напряженного состояния можно определить по формуле (2) [22]:

$$k_{\text{жс}} = \frac{\sigma}{T} = -\frac{P}{0,58\sigma_s}. \quad (2)$$

В некоторых работах [22] среднее значение показателя напряженного состояния для кручения принимается равным нулю, т.е. $(k_{\text{жс}})_{\text{ср}} = 0$.

При растяжении цилиндрических образцов с выточкой происходит изменение параметров шейки. Разрушение наступает на оси образца в зоне шейки, где схема напряженного состояния близка к схеме всестороннего растяжения. Средний за процесс деформирования показатель напряженного состояния рассчитывается по формуле (3) [22]:

$$k_{\text{жс}} = \left(\frac{\sigma}{T} \right)_{\text{ср}} \approx 0,72 + \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \left[1 + \frac{3}{4} \left(\frac{d_0}{R_0} \right) \right], \quad (3)$$

где d_0 и R_0 – величины, характеризующие размеры шейки образцов.

Накопленная степень деформации сдвига (Λ_p), соответствующая моменту разрушения образца, определяется по формуле (4) [22]:

$$\Lambda_p = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_h}, \quad (4)$$

Из работы [22] известно, что величина Λ_p при растягивающем кручении определяется

путем суммирования предельной степени деформации сдвига при кручении $\Lambda_{p.k}$ и растяжении $\Lambda_{p.в}$. Согласно работе [22], предельную степень деформации сдвига для кручения $\Lambda_{p.k}$ и растяжения $\Lambda_{p.в}$ можно определить по формуле (5):

$$\Lambda_{p.k} = \gamma = \frac{\pi \cdot d_o \cdot n}{l_o}; \quad \Lambda_{p.в} = \ln(d_o / d_k)^2, \quad (5)$$

где n – число оборотов активного захвата до разрушения образца;
 l_o и d_o – начальная и конечная длина и диаметр образца;
 d_k – конечный диаметр заготовки.

Следует отметить, что пластометр STD 812 позволяет без затруднений определить начальные, промежуточные и конечные геометрические параметры образцов.

По нашему мнению, при растягивающем кручении цилиндрических образцов показатель напряженного состояния можно определить как сумму величин, рассчитанных по формуле (2) и (3).

Результаты и их обсуждение.

Компьютерное моделирование прокатки заготовок в ПКС позволило установить, что:

- захват заготовки клетями ПКС приводит к возникновению в очаге деформации минимальных по величине растягивающих (σ_{11} , σ_{22}) и сжимающих (σ_{33}) напряжений, а дальнейшая прокатка – к разноименным напряженным состояниям, значения которых изменяются в диапазоне, МПа: σ_{11} от 25,181 до 146,981 (рисунок 4а); σ_{33} от 41,208 до 90,454 (рисунок 4б); σ_{22} от 3,681 до 68,243 (рисунок 4в);

- при прокатке заготовки в первой клетии ПКС интенсивности напряжений и деформаций локализуются в зонах захвата металла валками, а с увеличением обжатия величины данных параметров повышаются в центре и по краям деформируемой заготовки;

- деформирования заготовки в следующих клетях ПКС позволяют постепенно перенести участок сосредоточения интенсивности напряжений и деформаций от поверхностной зоны к центральным слоям заготовки, а затем равномерно деформировать полосу по всей ее длине (рисунки 5а, б);

- равномерное распределение интенсивности деформаций приводит к равномерному распределению степени деформации сдвига (накопленной деформации) по сечениям полосы. При этом наиболее равномерное распределение накопленной деформации по сечениям полосы получается при прокатке с единичным обжатием в первой клетии 20 %, во второй клетии 20 %, в третьей клетии 20 %, в четвертой клетии 15 %; в пятой клетии 10 %;

- прокатка в ПКС приводит к интенсивному охлаждению участков полос, находящиеся в зонах контакта металла с валком (рисунок 5в);

- в процессе прокатки заготовок из стали 08кп в ПКС наибольшая величина коэффициента жесткости схемы напряженного состояния возникает по краям полос;

- при любых условиях прокатки в ПКС большая часть пластической зоны находится под всесторонним неравномерным сжатием и в некоторых условиях на небольшом участке полос, располагающемся по краям полос, появляются незначительные по величине растягивающие напряжения.

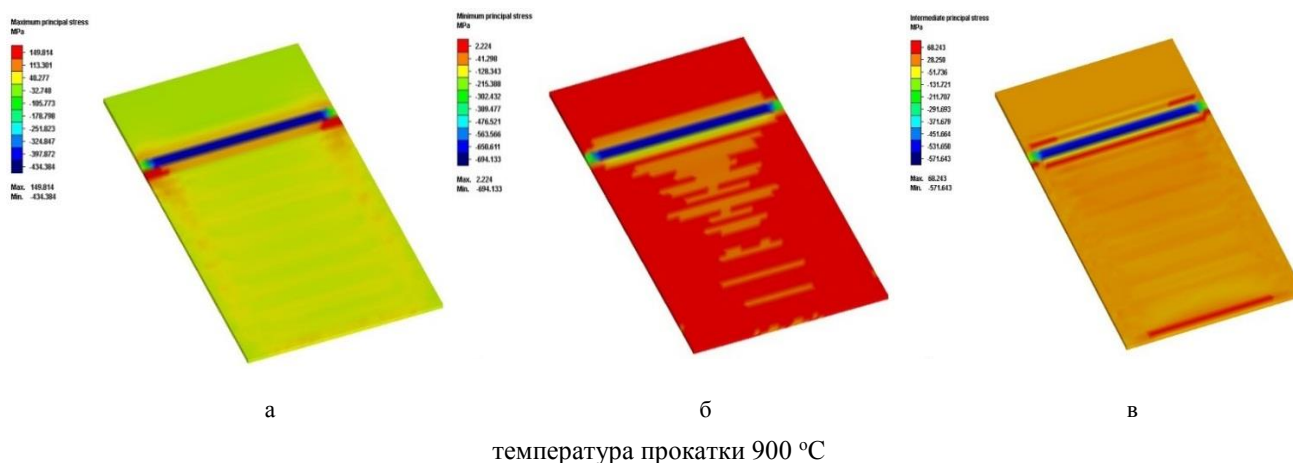


Рисунок 4 – Картина распределения главных напряжений σ_{11} (а), σ_{33} (б) и σ_{22} (в) в заготовке при прокатке в последней клетии ПКС

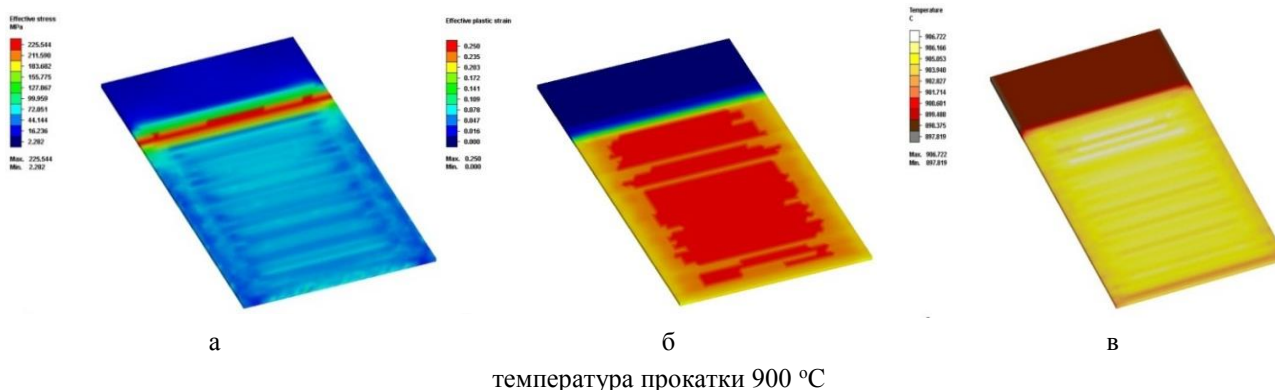


Рисунок 5 – Картина распределения интенсивности напряжений (а), деформаций (б) и температурного поля (в) в заготовке при прокатке в последней клетке ПКС

По вышеописанной методике построили график предельной пластичности и произвели расчет степени использования ресурса пластичности (СИРП).

График изменения предельной пластичности (рисунок б) показывает, что область максимального значения пластичности для стали 08кп лежит в диапазоне температур 900-1100 °С.

При температурах 500 и 700°С сталь 08кп имеет высокое скоростное упрочнение и сравнительно низкий уровень значений предельной пластичности (рисунок б). Следовательно, данная сталь обладает пониженной технологической деформируемостью.

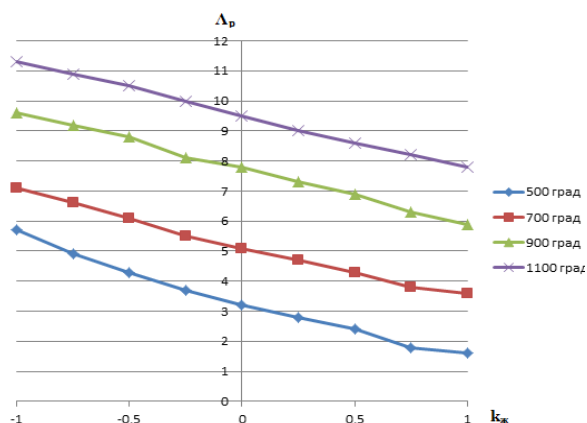


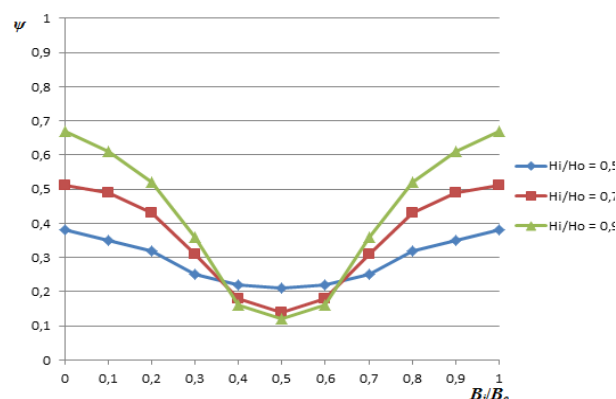
Рисунок 6 – Кривые предельной пластичности стали 08кп

При температурах выше 900 °С увеличение $\bar{\epsilon}$ также значительно снижает деформационное упрочнение, что приводит к существенному повышению пластичности стали 08кп. Если при 700 °С величина $A_p(\bar{\epsilon})$ изменяется в диапазоне 3,25–7,1, то в диапазоне от 900 до 1100 °С этот показатель достигает значений от 5,9 до 11,3 (рисунок 6). Следовательно, температурный диапазон от 900 до 1100 °С является наилучшим для пластической деформации стали,

поскольку здесь интенсивно проходят процессы динамической полигонизации и рекристаллизации, стабилизирующие структурное состояние данной стали.

В целом сталь 08кп характеризуется достаточно высоким уровнем предельной пластичности и имеет широкий диапазон удовлетворительной деформируемости. С ростом температуры испытания наблюдается повышение значения предельной пластичности при рассмотренных скоростях деформации. При этом значение A_p выше для более низкой скорости деформации, когда процессы динамического разупрочнения успевают проходить в более полной мере.

Следует отметить, что при прокатке ПКС полос из стали 08кп степень использования ресурса пластичности не превышает единицы, что показывает отсутствие нарушения сплошности материала заготовки в применяемом процессе обработки металлов давлением (рисунок 7).



B_i, H_i – расстояние до исследуемой точки по ширине и высоте полосы; B_0, H_0 – ширина и высота очага деформации

Рисунок 7 – Распределение СИРП по сечению заготовки при прокатке полос в продольно-клиновом стане

Выводы. Установлено, что прокатка в многофункциональном ПКС приводит к локализации интенсивности напряжений и деформации в начальном этапе прокатки в зонах захвата заготовки валком, а на последующих этапах участки сосредоточения интенсивности напряжений и деформаций постепенно переносятся от центральных слоев к поверхностным зонам и краям заготовки.

Постепенный перенос интенсивности напряжений и деформации от центра к краям и поверхности заготовки позволяет путем подбора рациональных деформационных режимов прокатки получать полосы с мелкозернистой структурой.

Прокатка на ПКС стали 08кп позволяет без нарушения сплошности металлозаготовки обработать полосу.

ЛИТЕРАТУРА

1 Мазур В.Л., Ноговицын А.В. Теория и технология тонколистовой прокатки (Численный анализ и технические приложения). – Днепропетровск: РВА Дніпро-VAL, 2010. – 500 с.

2 Федонин О.В., Унру С.Я., Немкин М.В., Даниленко Д.Н., Кандауров Е.Л. Перспективы развития производства холоднокатаного проката на мировом и российском рынках // *Металлург.* – 2011. – № 5. – С. 9–17.

3 Иванченко В.Г., Тилик В.Т., Штегно О.Н., Голубых Г.Н., Коваль С.Н., Панченко В.С. Современные тенденции развития технологии производства горячекатаных особо тонких полос // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. – Дніпропетровськ: ІСМ НАН України, 2004. – Вып. 8. – С. 232–38.*

4 Зиновьев А.В. Технология прокатки и смотки тонких полос на литейно-прокатном агрегате // *Новости черной металлургии за рубежом.* – 2006. – № 2. – С. 49–52.

5 Салганик В.М., Гун И.Г., Карандаев А.С., Радионов А.А. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. – 506 с.

6 Рудой Л.С. Двухвалковая установка непрерывной разливки стали (ДВ УНРС) // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* – 2010. – №7. – С. 244–246.

7 Grydin O., Baturshina E., BachFr.W. Mathematische Modellierung des Giebens von dunnen Blechennachdem Zwei-Rollen-Verfahren // 27th CADFEM Users' Meeting: Proceedings of ANSYS Conf. – Leipzig, Germany, 2009. – S. 1–9.

8 Егоров В. В., Сосенко В. Ю., Сосенко С. Ю. Литейно-прокатный агрегат с двухвалковой машиной для производства стального горячекатаного листа // *Тяжелое машиностроение.* – 2006. – № 5. – С. 8–11

9 Гун И.Г., Салганик В.М., Пивоваров Ф.В. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты: развитие технологии, компоновок и оборудования // *Черная металлургия: Бюл. НТИЭ.* – 2000. – Вып. 3-4. – С. 23–25.

10 Ефименко С.П., Тарасевич Ю.Ф. Перспектива производства особо тонкого горячекатаного листа // 3-ий конгр. прокатчиков: Тр. конгр. – Москва, Россия, 2008. – С. 60–65.

11 Антипин В.Г. Прогресс в производстве тонких стальных полос // *Бюллетень. Черная металлургия.* – 2002, – № 8. – С. 3–9.

12 Бобих П., Бореи Р., Ротта М. Тенденции развития технологии и оборудования для производства высококачественной полосовой стали // 4-ый конгр. прокатчиков: Тр. конгр. – Магнитогорск, Россия, 2001, 16-19 окт. – С. 54–57.

13 Рахадиллов Б. К., Степанова О. А., Сагдолдина Ж. Б., Байсеркенова Т. Н. Структура поверхности быстрорежущей стали Р6М5 после электронно-лучевой обработки. // *Комплексное использование минерального сырья.* – 2017, – № 3 – С. 54–58.

14 Кулик А.Н., Юрков К.Ю., Файчак А.А., Шевченко В.В. Перспективные конструкции прецизионных станков. [Электрон. ресурс] 2008 – URL: http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/Zmmvp/2008_10/3.pdf. (дата обращения 13.05. 2009).

15 Пат. 20969РК. Непрерывный стан для прокатки полос из сталей и сплавов/ Машеков С.А., Нугман Е.З., Машекова А.С. Оpubл. 16.03.2009, Бюл. № 3.

16 Пат. 31750РК. Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки листов из сталей и сплавов/ Машеков С.А., Машекова А.С., Нугман Е.З. Оpubл. 30.12. 2016, Бюл. № 18.

17 Машеков С.А., Нургазаев А.Е., Нугман Е.З., Машекова А.С., Тусупкалиева Э.А. Многофункциональный продольно-клиновый стан для прокатки тонких полос из сталей и сплавов. – Алматы: NurPrint, 2018. – 307 с.

18 Иванов К.М., Шевченко В.С., Юргенсон Э.Е. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД: Учебное пособие. – С-Пб: Институт Машиностроения, 2000. – 217 с.

19 Солдаткин А., Голенков Ю. MSC. User Forge как один из элементов системы виртуального производства и управления качеством изделий // САПР и графика. – 2000. – № 7. – С. 11–13.

20 Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.

21 Grosman F., Hadasik E. Technologiczna plastycznosc metali. Badania plastometryczne. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2005, p. 11-12. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-610-614

22 Машекова А.С., Смаилова Н.Т., Машеков С.А. Проблемыковки титановых сплавов и их решения..Монография. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – Ч. 1, – 230 с, Ч. – 2 – 251 с.

REFERENCES

1 Mazur V.L., Novogitsyn A.V. *Teoriya i tekhnologiya tonkolistovoy prokatki.* (The theory and technology of thin sheet rolling). Dnepropetrovsk: Dnipro-VAL. 2010. 50. (in Russ.).

2 Fedonin O.V., Unru S.Ya., Nemkin M.V., Danilenko D.N., Kandurov E.G. *Perspektivy razvitiya proizvodstva kholodnokatanogo prokata na mirovom i rossijskom rynkakh .* (Prospects of development of the production of cold-rolled steel in the world and Russian markets). *Metallurg = Metallurgist.* 2011. 5. 9–17. (in Russ.).

3 Ivanchenko V.G., Tiliik V.T., Shtegno O.N., Golubyy G.N., Koval' S.N., Panchenko V.S. *Sovremennyye tendentsii razvitiya tekhnologii proizvodstva goryachekatannykh osobotonkikh polos.* (Modern trends development of technology for the production of hot-rolled extremely thin strips). *Fundamental'nye i prikladnye problem chernoy metallurgii Sb. nauch. tr.* (Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of sci. works). Dnepropetrovsk: ICHM NAS Ukraine, 2004. 8. 232–238. (in Russ.).

- 4 Zinov'ev A.V. *Tekhnologiya prokatki i smotki tonkikh polos na litejnoprokatnom agregate* (Technology of rolling and scrubbing thin strips on a casting aggregate). *Novosti chernoy metallurgii zarubejom = News of ferrous metallurgy abroad*. **2006**. 2. 49–52. (in Russ.).
- 5 Salganik V.M., Gun I.G., Karadaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye litejno-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stal'nykh polos* (Thin-slab casting and rolling units for the production of steel strips). Moscow: MG TU of Bauman. **2003**. 506. (in Russ.).
- 6 Rudoj L.S. *Dvukhvalkovaya ustanovka nepreryvnoj razlivki stali* (Twin roll continuous casting of steel). *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' = Metallurgy and mining-ore industry*. **2010**. 7. 244–246. (in Russ.).
- 7 Grydin O., Batoryshina E., BachFr.W. *Mathematische Modellierung des Gießens von dünnen Blechnachdem Zwei-Rollen-Verfahren. 27th CADFEM Users' Meeting: Proceedings of ANSYS Conf., Leipzig, Germany, 2009*. 1–9. (in German).
- 8 Egorov V.V., Sosenko V.U., Sosenko S.U. *Litejno-prokatnyy agregat s dvukhvalkovoy mashinoy dlya proizvodstva stal'nogo goryachekatanogo lista* (Casting-rolling machine with a twin roll machine for producing hot-rolled steel sheet). *Tyazheloe mashinostroenie = Basic engineering industry*. **2006**. 5. 8-11. (in Russ.).
- 9 Gun I.G., Salganik V.M., Pivovarov F.V. *Tonkoslyabovye litejno-prokatnye agregaty: razvitiye tekhnologii, komponovki oborudovaniya* (Thin-slab casting and rolling units: the development of technology, layouts and equipment). *Chernaya metallurgiya = Ferrous metallurgy. Bul. NTiA*, **2000**. 3-4. 23-25. (in Russ.).
- 10 Efimenko S.P., Tarasevich U.F. *Perspektiva proizvodstva osobotokogo goryachekatanogo lista* (Perspective of production of extra-thin hot-rolled sheet). *3-ij kongr. prokatchikov: tr. kongr.* (3-th congr. of roller-men: proceedings of congress). Moscow, Russia, **2008**. 60-65. (in Russ.).
- 11 Antipin V.G. *Progress v proizvodstve tonkikh stal'nykh polos* (Progress in the production of thin steel strips). *Chernaya metallurgiya = Ferrous metallurgy. Bul.* **2002**. 8. 3-9. (in Russ.).
- 12 Bobih P., Borei R., Rotta M. *Tendentsii razvitiya tekhnologii i oborudovaniya dlya proizvodstva vysokokachestvennoj polosovoy stali* (Trends in the development of technology and equipment for the production of high-quality strip steel) *4-yy kongr. prokatchikov: tr. kongr.* (4-th congr. of roller-men: proceedings of congress). Magnitogorsk. Russia. **2001**. 16–19 October, 54-57. (in Russ.).
- 13 Rakhadilov B.K., Stepanova O.A., Sagdoldina Zh.B., Baiserkenova T.N. *Struktura poverkhnosti bystrorezhushchej stali R6M5 posle ehlektronno-luchevoj obrabotki* (The R6M5 fast-cutting steel surfaces structure after electron beam treatment). *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex use of mineral resources*. **2017**. 3. 54–58. (in Russ.).
- 14 Kulik A.N., Urkov K.U., Fajchak A.A., Shevchenko V.V. *Perspektivnye konstruksii pretsizionnykh stanov* (Promising constructions of precision equipment). **2008** URL: http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Zmmvp/2008_10/3.pdf. (Date of access 13.05. 2009). (in Russ.).
- 15 Pat. 20969 KZ. *Nepreryvnyy stan dlya prokatki polos iz stalej i splavov* (Continuous rolling mill to strips of steels and alloys) / Mashekov S.A., Nugman E.Z., Mashekovai A.S. Opubl. 16.03. **2009**, 3. (in Russ.).
- 16 Pat. 31750 RZ. *Mnogofunktional'nyy prodol'no-klinovyy stan dlya prokatki listov iz stalej i splavov* (Multifunctional longitudinal-wedge rolling mill for rolling sheets of steels and alloys) / Mashekov S.A., Mashekovai A.S., Nugman E.Z. Opubl. 30.12. **2016**, 18. (in Russ.).
- 17 Mashekov S.A., Nurtazaev A.E., Nugman E.Z., Mashekovai A.S., Tusupkalieva A.A. *Mnogofunktional'nyy prodol'no-klinovyy stan dlya prokatki tonkikh polos iz stalej i splavov* (Multifunctional longitudinal-wedge rolling mill for rolling sheets of steels and alloys) Almaty: Nur Print, **2018**. 307. (in Russ.).
- 18 Ivanov K.M., Shevchenko V.S., Urgenson A.E. *Metod konechnykh ehlementov v tekhnologicheskikh zadachakh OMD. Uchebnoe posobie*. (Method of finite elements in technological problems of OMD. Tutorial). Sankt-Peterburg: Institut Mashinostroeniya, **2000**. 217. (in Russ.).
- 19 Soldatkin A., Golenrov U. *Programma MSC. Super Forge kak odin iz ehlementov sistemy virtual'nogo proizvodstva i upravleniya kachestvom izdelij* (MSC. User Forge as one of the elements of the virtual production and product quality management system). *SAPR i grafika = SAPR and graphics*. **2000**. 7. 11–13. (in Russ.).
- 20 Bogatov A.A., Mijirickij O.I., Smirnov S.V. *Resurs Plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem* (Resource of plasticity of metals in pressure treatment). Moscow: Metallurgiya, **1984**. 144. (in Russ.).
- 21 Grosman F., Hadasik E. *Technologiczna plastycznosc metali. Badania plastometryczne*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej. **2005**. 11–12. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-610-614 (in Polish.)
- 22 Mashekovai A.S., Smailova N.T., Mashekov S.A. *Problemy kovki titanovykh splavov i ikh resheniya. Monografiya*. (Problems of forging titanium alloys and their solutions. Monograph). Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. **2013**. 1, 230, 2. 251. (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Осы мақалада дайындаманы бойлық-сыналы орнақта илемдеген кезде, пайда болатын кернеулі-деформациялы күйі зерттелген. Шеткі элемент әдісімен және «MSC.Super Forge» бағдарламасымен бойлық-сыналы орнақта илемдеуді модельдеп, кернеулі-деформациялы күй мен температураның таралуының негізгі заңдылықтары анықталған және сандық мәліметтері табылған. Илемдеуді модельдеген кезде әртүрлі дара жаншулар қолданылған. Илемділік шегін анықтау үшін STD 812 пластометрі қолданылып, сынаулар жүргізілді. Осы пластометр 1500 °С температурасына дейігі температураларда үлгіліктерді бұраумен, қысумен және тартумен сынауға мүмкіндік береді. Сынағанда, әрбір өтімде берілген деформация дәрежесімен және жылдамдығымен дайындаманы үздіксіз немесе бөлшектеп жаншуды іске асыруға болады. Пластометр, металдар мен қорытпалардың деформация кедергісі қысық сызығын автоматты бере алатын басқару блогымен және компьютер бағдарламасымен қамтамасыз етілген. Болат 08кп жеткілікті жоғары илемділік шегіне және қанағатанарлық деформацияланудың кең аралығына иемденетіндігі дәлелденген. Сынау температура өскен сайын, қолданылған деформация жылдамдықтарында илемділік шегі де жоғарылайтындығы және бойлық сыналы орнақта болат 08кп жасалған жолақты илемдегенде металдың тұтастылығы бұзылмай деформация іске асырылатындығы дәлелденген. Көпқызыметті бойлық-сыналы орнақтың бастапқы сатысында дайындаманы илемдеген кезде кернеу мен деформацияның қарқындылығы металды пішінбілікпен қарптитын аймақтарда шоғырланатындығы, ал келесі сатыларында кернеу мен деформация

карқындылықтарының мәндері, деформацияланатын дайындама ортасында немесе шетінде үлкейетіндігі жұмысты көрсетілді. Орнақ қапастары бойынша деформация мен кернеу қарқындылықтарының дайындама ортасынан шетіне қарай біртіндеп біркелкі таралуы, деформация ошағы бойынша ығысу деформациясы қарқындылығын біркелкі таратып, жоғары сапалы қаңылтырды алуға мүмкіндік жасайды.

Түйінді сөздер: илемдеу, кернеулі-деформациялы күй, сандық модельдеу, кернеу мен деформация қарқындылығы, дара жаншу, илемділік.

ABSTRACT

The paper presents results of investigation of stress-deformed state (SDS) of a metal block at rolling in longitudinal-wedge mill (LWM). The quantitative data obtained by the finite elements method and the MSC Super Forge program, and the main regularities in the distribution of SDS and the temperature at blanks rolling in a longitudinal-wedge mill with various unitary crimps were established. To determine the ultimate plasticity, the samples were tested on an STD 812 plastometer. This plastometer allows testing specimens by torsion, stretching and compression at temperatures up to 1500 °C. The test is performed with continuous or fractional crimp with a given degree and strain rate at each passing. The plastometer is equipped with a control unit and a computer program that allow automatic output of the resistance curves of deformation of metals and alloys. It is established that the steel 08kp is characterized by a sufficiently high level of ultimate plasticity and has a wide range of satisfactory deformability. It is found an increase of the value of the ultimate plasticity at the examined deformation rates with increasing test temperature, and the rolling of strips of the steel 08kp in the longitudinal-wedge mill is carried out without disrupting the continuity of the billet material. It is shown that rolling in multifunctional LWM leads to the localization of stress intensity and deformation in the initial stage of rolling in the zones of capture of the workpiece by a roller. At subsequent stages, the sections concentrating the intensity of stresses and deformations gradually transferred from the central layers to the surface zones and edges of the workpiece. Gradual transfer of intensity of stresses and deformation from the center to the edges and the surface of the workpiece makes it possible, by selecting rational deformation modes of rolling, to obtain high-quality bands with a fine-grained structure.

Key words: rolling, stress-strain state, numerical modeling, stresses intensity, deformations, plasticity

Поступила 27.03.2018

УДК 669.017:539.4

МРНТИ 53.49.15

<https://doi.org/10.31643/2018/6445.9>

**Комплексное использование
минерального сырья. № 2. 2018.**

А. В. ПАНИЧКИН^{1}, И. Е. КАЛАШНИКОВ², Б. Б. КШИБЕКОВА^{1,3}, А. Т. ИМБАРОВА¹*

¹*Институт Металлургии и обогащения, Алматы, Казахстан, *e-mail: abpanichkin@mail.ru.*

²*Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН, Москва Россия*

³*Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан*

РАЗРАБОТКА НОВОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО АРМИРОВАНИЯ ЛИТЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ КАРБИДОМ ТИТАНА

Received: 01 March 2018 / Peer reviewed: 16 April 2018 / Accepted: 18 May 2018

Резюме. В работе с целью совершенствования способа получения и повышения характеристик литых алюмоматричных композиционных материалов, дисперснонаполненных карбидом титана исследованы структура и свойства композитов, армированных методами in-situ и ex-situ. Для этого использованы способы синтеза TiC под слоем расплава при введении прессовок из смеси порошков титана и графита, титана и карбида алюминия и механическое замешивание в алюминиевый расплав предварительно синтезированных порошков TiC и TiC в матрице Al₃Ti. Показано, что in-situ метод армирования алюминия и алюминиевых сплавов дискретными частицами карбида титана характеризуется низкой эффективностью, что связано с интенсивным смачиванием расплавом порошков титана в объеме прессовок при их введении. В результате этого активно формируется фаза Al₃Ti, что препятствует протеканию самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) между титаном и углеродом либо карбидом алюминия. Установлено, что этот метод не пригоден для армирования алюминиевых сплавов, легированных кремнием и магнием, ввиду практически полного прекращения синтеза карбида титана и активного формирования алюмосилицидов и алюминидов титана, что сопровождается разбрызгиванием расплава. СВС-реакция в прессовках из смеси Al₄C₃ и Ti в условиях нагрева со скоростью до 6000 град/ч приводит к формированию дисперсных карбидов TiC и Ti₃AlC₂ глобулярной формы в матрице из Al₃Ti. С повышением скорости нагрева и увеличения теплоотвода растёт количество неравновесных фаз, формирующихся при реакции. Обнаруженное в таких условиях