

УДК 621.771:004.18

Смирнов Е. Н.
Смирнов А. Н.
Жога А. Ю.
Скляр В. А.
Снитко С. А.

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ БЛЮМОВ В ЛИНИИ МНЛЗ СО СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ

Неуклонное повышение требований к качеству непрерывнолитого сортового слитка, особенно используемого в дальнейшем для производства сортового проката машиностроительного сортамента, стимулировало в последнее десятилетие развитие новых схем реализации процесса «мягкого» обжата (в англ. литературе – *soft reduction* или *mechanical soft reduction – MSR*), являющегося одним из наиболее эффективных способов повышения качества внутренних слоёв непрерывнолитого слитка [1–3].

Согласно данным работы [4] можно выделить следующие основные направления усовершенствования классической схемы MSR непрерывнолитых сортовых слитков:

- изменение формы поперечного сечения отливаемого блюма;
- совершенствование геометрии рабочего инструмента;
- изменение направления приложения внешнего деформационного воздействия.

При этом преследуется цель интенсификации процесса проработки как литой структуры металла закристилизовавшейся составляющей, так и находящейся в жидко-твёрдом состоянии осевой области непрерывнолитого слитка, в том числе и за счёт создания дополнительных сдвиговых деформаций [5–6]. Однако можно констатировать, что вопросы реализации новых схем MSR, при которых возникают дополнительные сдвиговые деформации, в имеющихся публикациях рассмотрены лишь на уровне первичных лабораторных исследований или высказываний о целесообразности применения.

Известны три случая прокатки, при которых возможно появление сдвиговой деформации: прокатка с различной окружной скоростью рабочих валков; асимметричная прокатка; прокатка в попарно скрещающихся валках. В тоже время, в литературе отсутствует информация об исследованиях, касающихся как оценки возможности реализации процесса деформирования непрерывнолитых сортовых слитков на стадии неполной кристаллизации в скрещенных валках, так и эффективности такого процесса с точки зрения проникновения деформации во внутренние области слитка, находящиеся в жидко-твёрдом состоянии. При этом данный подход к усовершенствованию классической схемы MSR блюмов вписуется в направление «Изменение направления приложения внешнего деформационного воздействия».

Работы в направлении усовершенствованию классической схемы MSR блюмов долгое время ведутся на кафедре ОМД Донецкого национального технического университета. В частности, был запатентован и достаточно широко исследован новый метод двухстадийного обжата непрерывнолитых блюмов и заготовок на стадии неполной кристаллизации [7].

Анализ результатов исследования вышеописанного способа с помощью математических и физических моделей, с одной стороны, показал высокую эффективность предложенного технического решения, а с другой – создал базу для разработки и патентования нового способа деформирования непрерывнолитых блюмов на стадии неполной кристаллизации в скрещенных профилированных валках [8]. В соответствии с новым способом обжата непрерывнолитых блюмов на первом этапе предусмотрено обжатие непрерывнолитого слитка в скрещенных валках, имеющих центральную цилиндрическую контактирующую часть, равную ширине незакристаллизовавшейся составляющей, а на втором этапе – предусмотрена процедура выравнивания поверхности контакта полученного подката с прожимом в середине широкой грани.

Целью настоящей работы является сопоставительная оценка вида возникающего напряженно-деформированного состояния (НДС) металла и эффективности проникновения деформации во внутренние области непрерывнолитого бляма при его редуцировании на стадии неполной кристаллизации в гладких и профилированных скрещенных валках.

Исследование выполнено методом математического моделирования с использованием конечно-элементной схемы применительно к условиям производства непрерывнолитых блямов сечением 335×400 мм.

На первом этапе работы проводилось моделирование процесса деформирования непрерывнолитого слитка из низколегированной конструкционной марки стали в гладких (непрофилированных) валках диаметром 500 мм при наличии скрещивания осей и без него (рис. 1). План-матрица первичного эксперимента приведена в табл. 1.

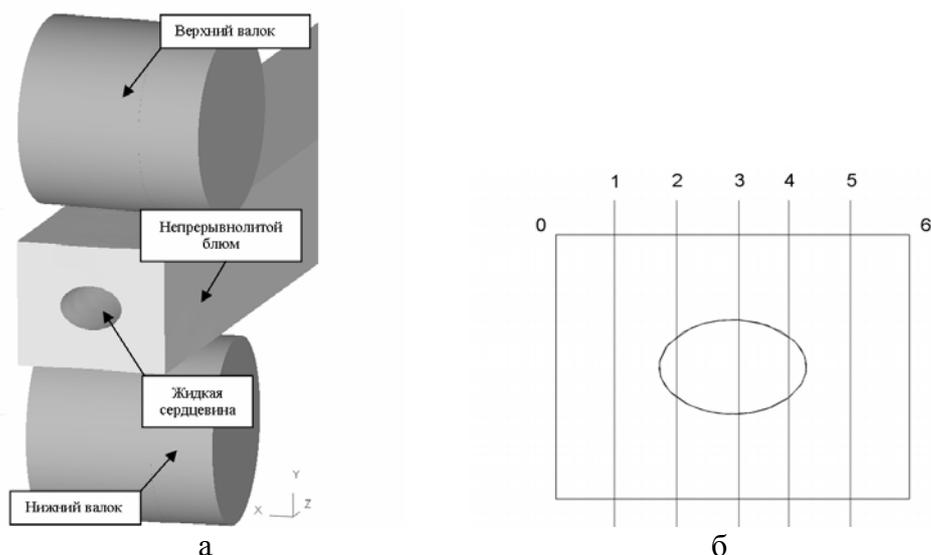


Рис. 1. Конечно-элементная модель деформирования непрерывнолитого бляма (а) и схема контрольных точек на контактной поверхности (б)

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов (1-й этап)

α	Интервал варьирования	Основной уровень	Верхний уровень	Нижний уровень
Угол скрещивания валков α , град.	0 и 2–6	4	6	2
Относительная степень деформации ε , %	0,6–1,2	0,9	1,2	0,6

На втором этапе работы применительно к тому же объекту проводилось моделирование процесса деформирования в профилированных валках при наличии скрещивания осей и без него. План-матрица вторичного эксперимента приведена в табл. 2.

Таблица 2

Уровни и интервалы варьирования факторов (2-й этап)

α	Интервал варьирования	Основной уровень	Верхний уровень	Нижний уровень
$\Delta\alpha^\circ$	2–6	4	6	2
$\varepsilon_{\text{центр}}$ %	0,6–1,2	0,9	1,2	0,6
$\varepsilon_{\text{края}}$	0,3	0,45	0,6	0,3
$\varepsilon_{\text{втор}}$	0,3	0,45	0,6	0,3

В ходе расчетного исследования изучали влияние величины угла скрещивания осей валков α и относительной степени деформации ε на распределение накопленной деформации Λ и интенсивности напряжений σ_i на плоскости контакта металла с валками, а также на эффективность проникновения деформации.

Ввиду того, что оси валков скрещены друг относительно друга, по ширине очага деформации было выделено две характерные области (рис. 1, б), расположенные слева и справа от продольной оси симметрии. В одной из них, деформация со стороны верхнего валка наступала раньше (смещение внутрь – 0, 1, 2), а в другой – деформация со стороны верхнего валка наступала позже (смещение наружу – 4, 5, 6).

Результаты эксперимента и их обсуждение. Проведенное численное исследование показало, что характер распределения накопленной деформации Λ и интенсивности напряжений σ_i на плоскости контакта металла с валками в каждой из выделенных областей имеет аналогичный характер. С учетом вышеизложенного, результаты расчетного исследования для точек, в которых деформация со стороны верхнего валка наступала раньше (направление скрещивания – внутрь), приведены на рис. 2 и 3. При этом в качестве объекта сравнения была выбрана классическая схема деформирования, в которой угол скрещивания валков составляет 0° .

Анализ полученных данных показывает, что на плоскости имеется четко выраженный минимум характерный для угла 2° . При этом, по мере роста α в пределах от 0° до 2° величина как Λ , так и σ_i снижаются в угловых точках (0 и б) рассматриваемого сечения. Величина уменьшения σ_i в угловых точках составляет не менее 3,7 ... 5,0 %, а Λ – 44,3 ... 45 %. В то же время, в центральных точках наблюдается прирост вышеуказанных величин: σ_i возрастает не менее чем на 4,7 ... 5,7 %, а Λ – на 44,9 ... 45,3 %.

В дальнейшем, по мере увеличения величин α от 2° до 6° наблюдается рост σ_i и Λ в угловых участках. Однако их величина не достигает уровня значений, которые характерны для случая прокатки в гладких валках. Результирующее приращение величин σ_i и Λ для угловых участков (точки 0 и б) составляет не менее 2 % и 31,2 % соответственно. Для центральных точек (точки 1–5) наблюдается менее интенсивный прирост как σ_i так и Λ , а именно 1,69 % и 5,57 % соответственно.

Профилирование редуцирующих валков позволило изменить характер распределения Λ и σ_i на контактной поверхности (рис. 4).

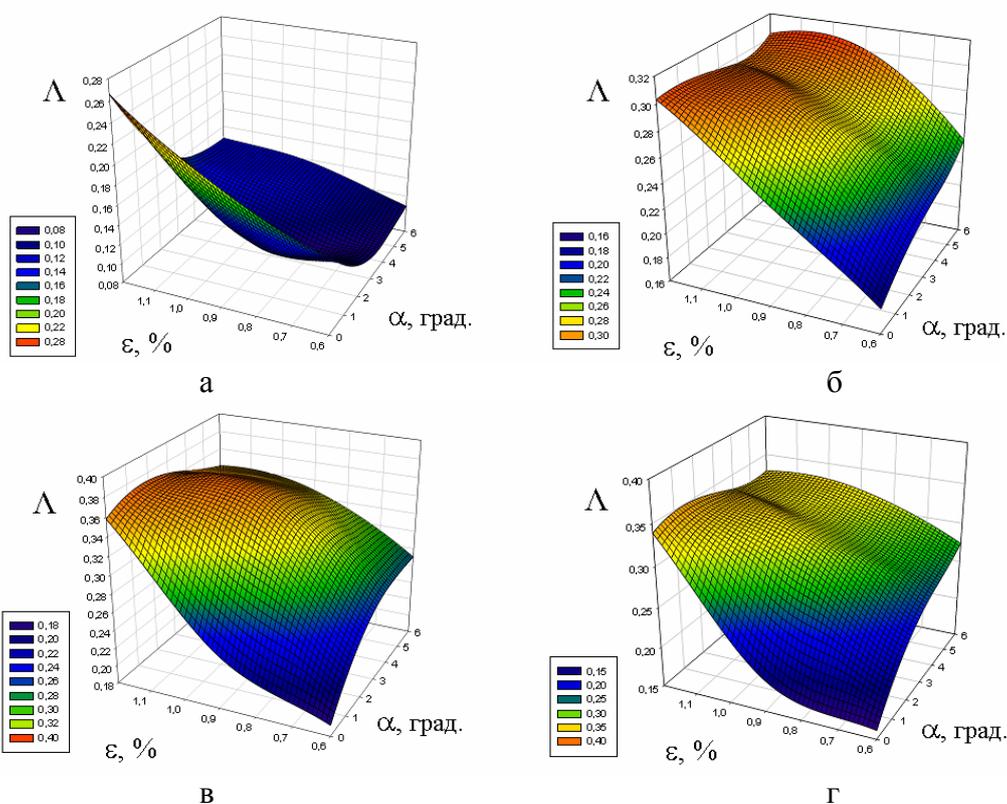


Рис. 2. Изменение Λ на контактной поверхности от α и ε при деформировании в гладких скрещенных валках:

а – $x_i/b = 0$; б – $x_i/b = 0,167$; в – $x_i/b = 0,333$; г – $x_i/b = 0,5$ (x_i и b – текущая поперечная координата контрольной точки и ширина бруса соответственно)

Из рис. 4 видно, что максимальная величина интенсивности накопленной деформации наблюдается в областях металла, примыкающих к границе центральной части большего диаметра. При этом в центре раската происходит наиболее интенсивное накопление деформации. Однако, его характер неустойчивый, поскольку имеются области взаимного проникновения. Результаты численного исследования представлены на рис. 5.

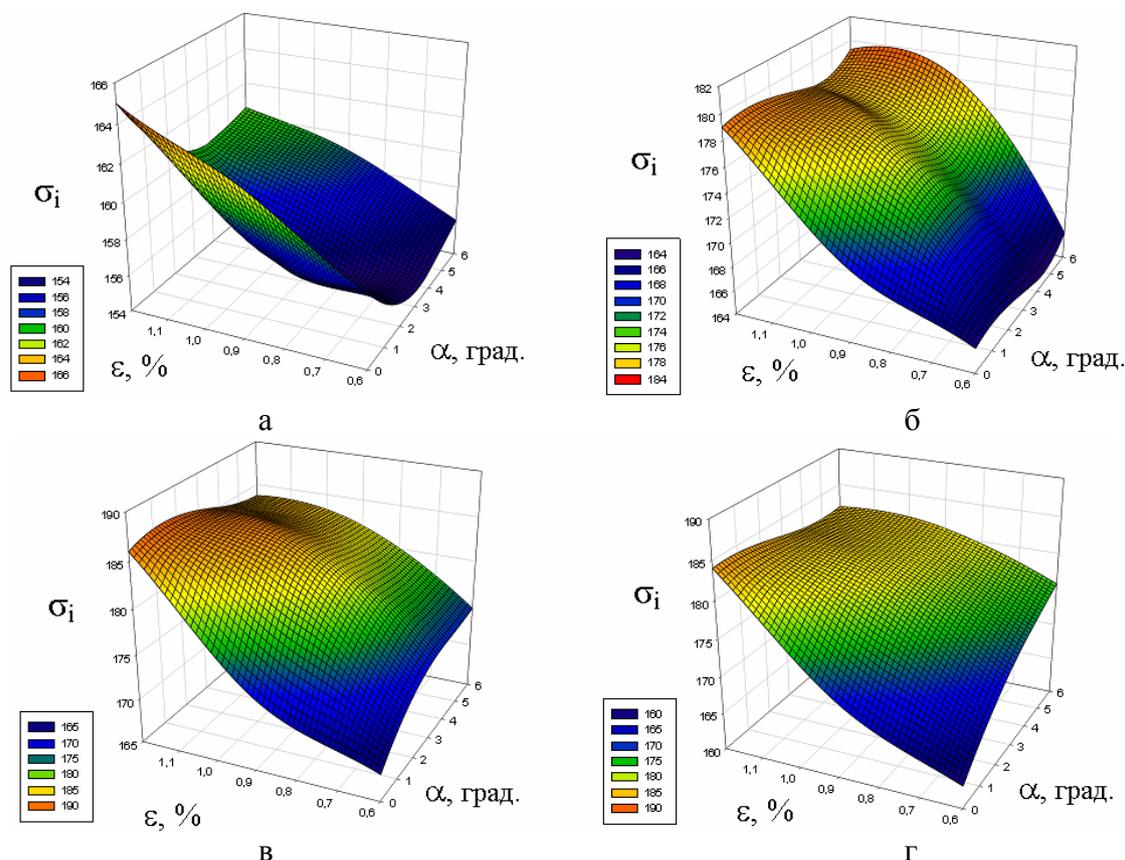


Рис. 3. Изменение σ_i на контактной поверхности от α и ε при деформировании в гладких скрещенных валках:

а – $x_i/b = 0$; б – $x_i/b = 0,167$; в – $x_i/b = 0,333$; г – $x_i/b = 0,5$

Влияние величины ε носит однозначный характер: с увеличением величины относительного обжатия интенсивность накопленной деформации возрастает. Сопоставление данных о характере накопления деформации, выполненное по сравнению с процессом деформации в гладких скрещенных валках, показало, что уровень Λ в случае прокатки в скрещенных валках в контактной зоне, которая соответствует профилированной части валков, выше на 25,9...30,4 %. В то время как на концевых участках бьюма, подвергающихся меньшей величине обжатия, прирост величины Λ менее интенсивен и составляет 6,3...16,1 %.

В то же время, влияние угла α носит не столь однозначный характер и различно по ширине контактной зоны. В целом, увеличение α приводит к уменьшению Λ на краевых участках слитка, в то время как в зоне контакта слитка с профилированной частью валков Λ возрастает. В зоне контактной поверхности, которая прилегает к профилированной части валка, влияние величины угла скрещивания носит неоднозначный характер, что связано с изменением ширины очага деформации при изменении угла скрещивания валков. Максимум степени накопленной деформации наблюдается при $\alpha = 3^\circ$.

Результаты анализа напряженно-деформированного состояния непрерывнолитого бьюма позволили сделать вывод о том, что использование профилированных валков приводит к незначительному росту σ_i в центральной области по сечению бьюма. В угловых участках наблюдается снижение величины σ_i на 5,3÷6,1 %, что особенно актуально с позиции сохранения целостности переохлажденных углов бьюма.

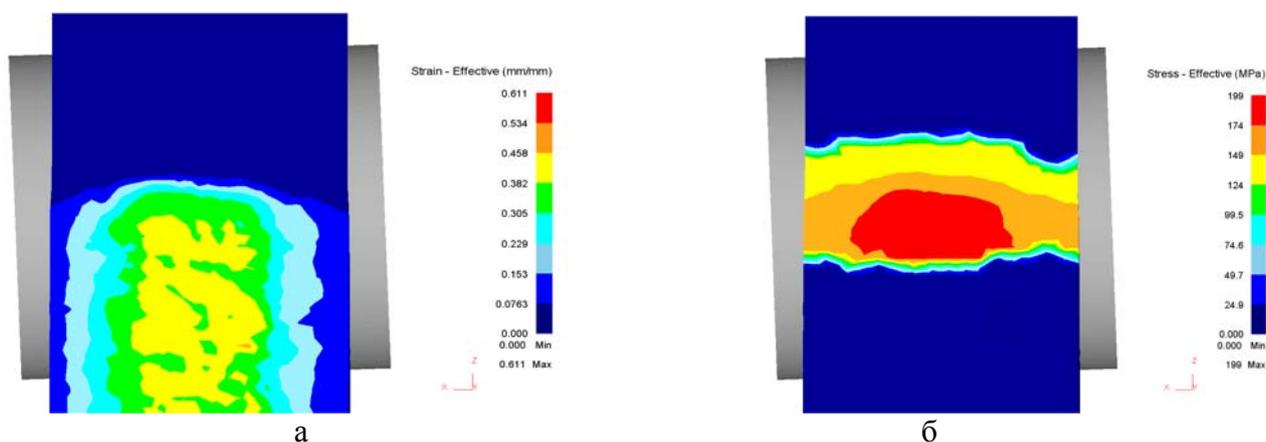


Рис. 4. Распределение Λ (а) и σ_i (б) на контактной поверхности при деформировании в скрещенных профилированных валках

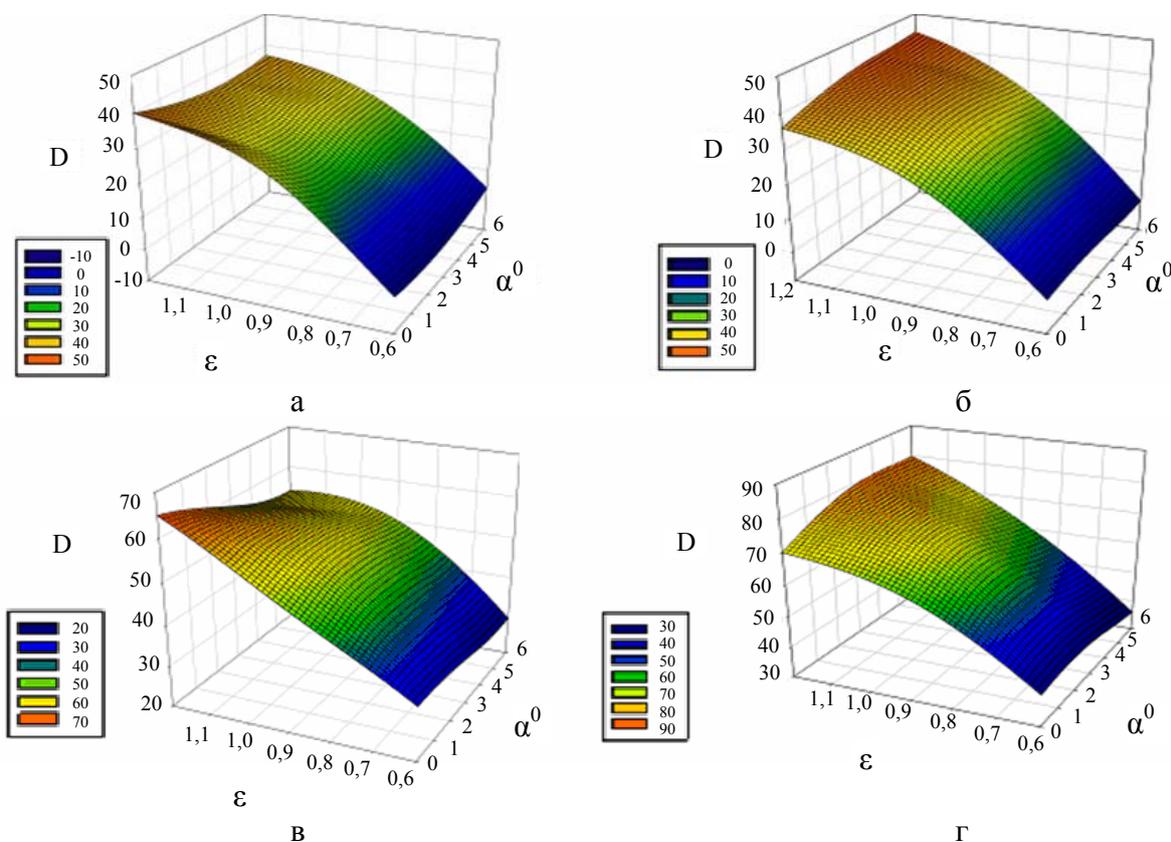


Рис. 5. Изменение Λ на контактной поверхности от α и ε при деформировании в профилированных скрещенных валках:

а – $x_i/b = 0$; б – $x_i/b = 0,167$; в – $x_i/b = 0,333$; г – $x_i/b = 0,5$

Приведенные данные позволяют утверждать, что использование скрещенных валков является очень эффективным средством управления процессом деформирования непрерывнолитых блюмов, особенно с точки зрения локализации деформационного процесса на определенном участке ширины блюма.

Характер проникновения деформации в разные слои металла по сечению непрерывнолитого блюма оценивали путем измерения площади овального отверстия, которое соответствовало жидко-твердой фазе до и после деформации.

Анализ полученных данных показал, что в сравнении с прокаткой в гладких валках наблюдается локализация процесса деформации в осевой части слитка (рис. 6). При этом в контактной зоне, которая соответствует профилированному участку валков, наблюдается возрастание глубины проникновения деформации D до 40 мм при $\varepsilon = 0,6\%$ и до 62 мм при $\varepsilon = 1,2\%$, т. е. наблюдается рост на 21,2% и 3,3% соответственно.

Следует отметить, что зависимость от угла скрещивания валков имеет экстремум, при котором обеспечивается максимальный прирост проникновения деформации. Так при значении $\alpha = 4^\circ$ глубина проникновения достигла 80 мм, что на 33,3 % больше чем в гладких валках без скрещивания, на 23 % выше, чем в гладких скрещенных валках и на 14,3 % выше, чем в гладких профилированных валках. Данное обстоятельство позволяет говорить о более эффективном процессе проникновения деформации при использовании профилированных валков.

На второй стадии деформации происходит выравнивания полученного подката с прожимом в середине широкой грани. Проведенное моделирование показало, что в процессе деформации вовлекается только часть слоев металла (рис. 7), а наибольший уровень σ_i наблюдается в области сопряжения поверхностей, имеющих различную высоту.

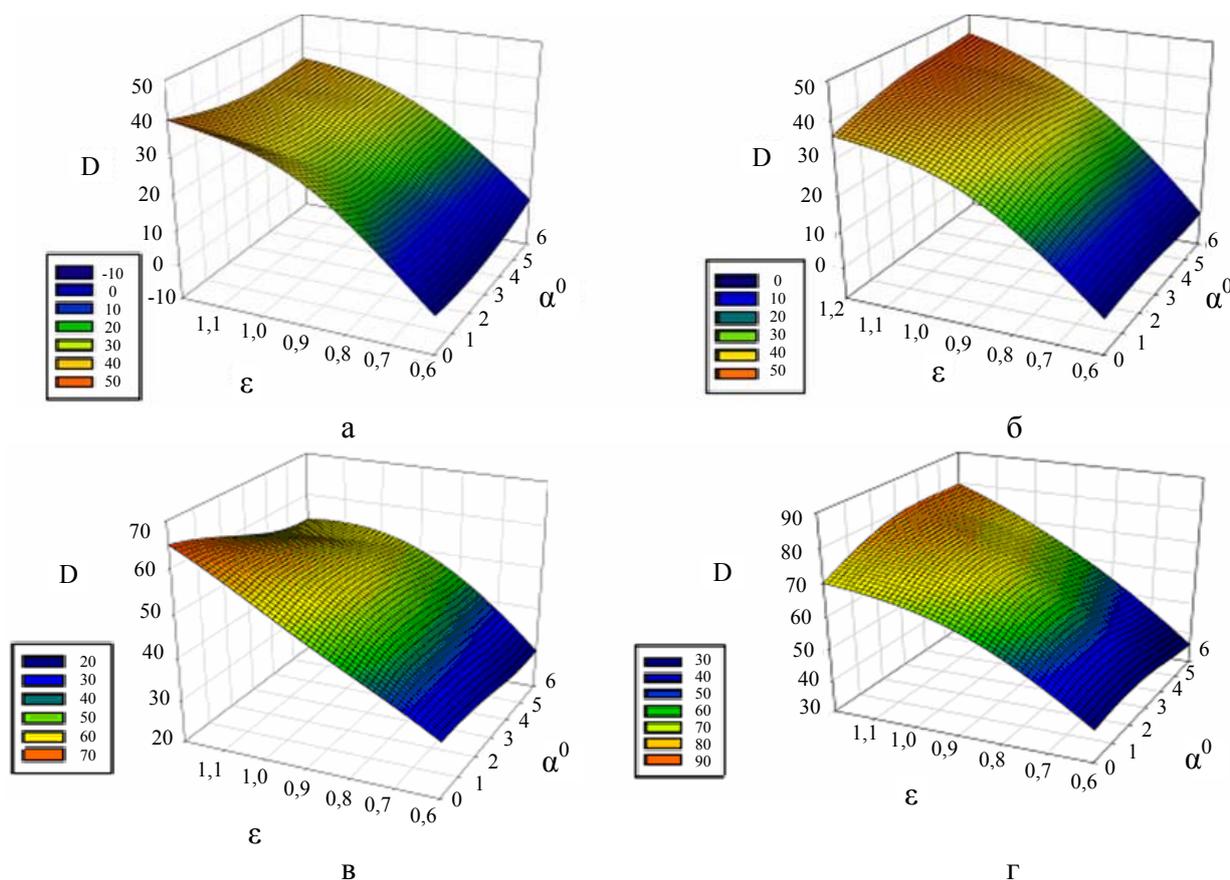


Рис. 6. Глубина распространения деформации D в слои металла закристаллизовавшейся составляющей бруса в зависимости от величины ϵ и α .

а – $x_i/b = 0$; б – $x_i/b = 0,167$; в – $x_i/b = 0,333$; г – $x_i/b = 0,5$

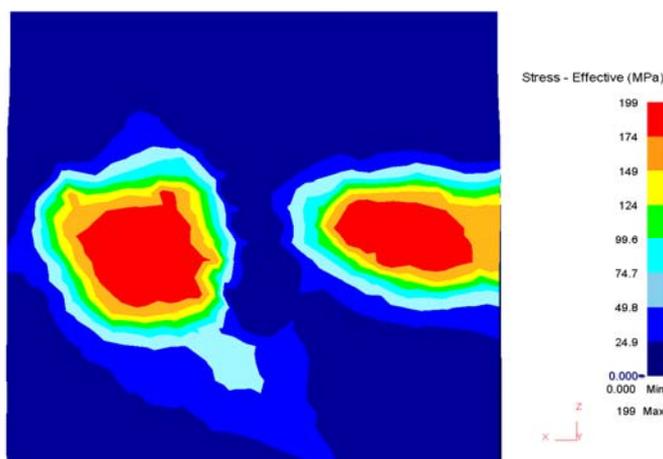


Рис. 7. НДС металла подката на контактной поверхности (второй этап деформирования)

Уровень σ_i в данных слоях металла превышает аналогичный на кромках более чем в 2 раза. Исследование характера проникновения деформации показало, что на стыках поверхностей также наблюдается максимальное проникновение деформации во внутренние слои. Однако эта величина меньше чем в случае классической схемы прокатки почти в 2 раза. Это служит неоспоримым фактом перераспределения величины проникновения деформации между проходами, что особенно ценно с точки зрения повышения эффективности обработки именно жидко-твердой составляющей.

ВЫВОДЫ

Проведение исследования позволяет сделать практический вывод о влиянии угла скрещивания осей валков, который может быть сформулирован в следующем виде: скрещивание валков на величину угла $2-3^\circ$ способствует минимизации уровня σ_i и Λ в угловых, наиболее переохлажденных участках поперечного сечения непрерывнолитого бьюма, минимизируя тем самым вероятность возникновения нарушений сплошности металла. Применение способа обжата непрерывнолитого слитка в профилированных скрещивающихся валках позволяет повысить эффективность проникновения деформации в осевую зону слитка не менее чем на 15 %, что достигается за счет рационального распределения деформации по ширине бьюма, а также возможностью регулирования ширины обжимаемого участка на первой стадии деформации в соответствии с изменяющимися условиями разливки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Isobe K. Improvement of segregation of continuously cast billet by soft reduction / K. Isobe, Y. Kusano, S. Noguchi [ea.] // Proc. Near-Net-Shape Casting in the Minimills, CIM: Vancouver. – 1995. – P. 179–192.
2. Sivessen P. B. Improvement of Center Porosity in Continuously Cast Blooms by Mechanical Soft Reduction at the End of the Solidification Process / P.B. Sivessen, S. Wass, B. Rogberg // 3rd European Conf. of Continuous Casting: Madrid, 20–30 October 1998. – Madrid, 1998. – P. 213–223.
3. Ney G. The new billet caster SO at Saarstahl AG Völklingen / G. Ney, E. Korte, K. J. Richter, R. Rüppel // Proc. 5th Europe Conf. on Continuous Casting. Nizza, Frankreich, 21. Juli 2005. – S. 374–381.
4. Determination technological capabilities of new processes in deformation of continuously cast blooms at the end of solidification / A. Mynayev, Y. Smirnov, V. Sklyar, A. Zhoga // X Miedzynarodowa konferencja naukowa "Nove technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej, 17–18 May 2010, Poland, Czestochowa: Politechnika Czestochowska. – 2010. – Nr. 2. – P. 62–70.
5. Быков П. О. Исследование формирования однородности непрерывнолитого слитка с целью улучшения качества прокатной продукции: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / П. О. Быков. – Караганда, 2010. – 21 с.
6. Nakahin H. Characteristics of steel plates rolled with shear deformation / H. Nakahin, T. Yamashita, T. Inoue et al. // Tetsu-to-Hagane. – 2003. – 89. – № 2. – P. 221–228.
7. Smirnov Y. Development of the method prevention of internal cracks in process of soft reduction continuously cast blooms / Y. Smirnov, V. Sklyar // 19-th International Metallurgical & Materials Conference «METAL-2010», Roznov pod Radhostem, 18–20 May 2010, Czech Republic. – Ostrava: VSB – Technical University, 2010. – B. 33.
8. Пат. на винахід 89961. Україна. МПК В 22 D 11/12, В 22 D 11/10, В 22 D 11/06, В 22 D 11/00, В 21 В 1/04 (2006.01), В 21 В 1/02 (2006.01), В 21 В 13/22 (2006.01). Спосіб обтиснення безперервнолитого бьюма або заготовки у рідкотвердому стані / Смирнов Є. М., Смирнов О. М., Скляр В. О., Горбунко О. І., Моцний В. В.; заявник та патентовласник Донец. нац. техн. ун-т. – № а200700576; заявлено 22.01.2007. опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6. – 4 с.

Смирнов Е. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;
Смирнов А. Н. – д-р техн. наук, проф. ДонНТУ;
Жога А. Ю. – магистр ДонНТУ;
Скляр В. А. – ассистент ДонНТУ;
Снитко С. А. – канд. техн. наук, доц. ДонНТУ.

ДонНТУ – Донецкий национальный технический университет, г. Донецк.

E-mail: smirnov@fizmet.dgtu.donetsk.ua