

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ С ДЕФЕКТОМ ФОРМЫ «РОМБИЧНОСТЬ» В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Smirnov Y., Snitko S., Krasenkov S.  
Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine ([info@dgtu.donetsk.ua](mailto:info@dgtu.donetsk.ua))

### THE INVESTIGATION OF THE UNINTERRUPTEDLY-CASTED BILLETS OF SMALL CROSS-SECTION WITH THE SHAPE DEFECT «RHOMBOIDITY» DEFORMATION PROCESS IN BOX PASSES

*Методом компьютерного конечно-элементного моделирования выполнен анализ процесса прокатки непрерывнолитой заготовки сечением 135×135 мм с дефектом формы «ромбичность» в обжимных калибрах прямоугольной формы для условий типового линейного среднесортного стана с диаметром валков 500 – 600 мм по действующим деформационно-скоростному и температурному технологическим регламентам. Выполнено обоснование режимов прокатки, обеспечивающих гарантированный захват заготовки валками, получение требуемой формы подката и минимизацию или частичную заварку диагональных трещин без выхода их на поверхность раската.*

*Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, ромбичность, диагональные трещины, прокатка, прямоугольный калибр, форма подката*

#### **Введение**

Дефекты формы поперечного сечения непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) являются следствием нарушений условий затвердевания металла в кристаллизаторе и последующего вторичного охлаждения в технологической линии машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). При последующей прокатке таких заготовок наибольшие проблемы возникают в тех случаях, когда они имеют значительную разницу в величинах диагоналей поперечного сечения ( $\Delta d$ ). При этом абсолютное значение  $\Delta d$  является, с одной стороны, величиной, которая характеризует дефект формы поперечного сечения НЛЗ – «ромбичность», а с другой – предопределяет принципиальную возможность их стабильной прокатки в прямоугольных калибрах обжимных клетей с гарантированным получением требуемой формы и размеров подката для черновых калибров.

Анализ данных имеющегося промышленного опыта прокатки НЛЗ с дефектом формы «ромбичность» показал, что при величине ромбичности более 15 мм возникают проблемы с обеспечением стабильных условий начального захвата заготовки валками. Также наблюдается искажение формы подката после первого прохода. Это делает невозможным его дальнейшую прокатку. Кроме того, особого внимания заслуживает вопрос, связанный с изучением поведения диагональных трещин при прокатке. Как известно [1, 2], именно диагональные трещины в поперечном сечении заготовок сопутствуют дефекту «ромбичность».

В сложившейся производственной практике НЛЗ с большой величиной  $\Delta d$  подвергаются предварительной огневой зачистке с целью частичного исправления формы поперечного сечения. Это приводит к дополнительным потерям металла (угар и обрызг), а также к незапланированным затратам на выполнение операции огневой исправления формы поперечного сечения заготовки.

#### **Цель**

Целью настоящей работы является оценка технологической возможности получения качественного подката из НЛЗ с большой величиной «ромбичности» и диагональными трещинами, не выходящими на поверхность заготовки.

#### **Исследование**

В качестве метода исследования использовали метод конечно-элементного моделирования. Реализация модели выполнена в системе DEFORM 3D, разработанной компанией Scientific Forming Technologies Corporation и предоставленной по временной лицензии компанией ТЕСИС (г. Москва, Российская Федерация).

Проверку адекватности конечно-элементной модели выполняли по фактическим данным формоизменения металла НЛЗ сечением 135×135 мм в обжимной клетке типового линейного среднесортного стана с диаметром валков 500 - 600 мм по действующему деформационно-скоростному и температурному

технологическим регламентам. В ходе опытно-промышленной прокатки были прокатаны заготовки с различной величиной начальной “ромбичности” ( $\Delta d$ ).

При выполнении расчетного исследования с помощью разработанной математической модели рассматривали два варианта схемы деформирования. Первый вариант базировался на схеме бескалибровой прокатки, идея которого изложена в работе [3]. Однако, в отличие от изложенного подхода, вместо валков с гладкой бочкой использовали валки с нарезанными на них прямоугольными калибрами. Основная идея такой схемы деформирования заключалась в том, что введение прямоугольного калибра на начальной стадии деформирования предотвратит потерю устойчивости заготовки (сваливание) за счет ее фиксирования только в углах калибра и отсутствия ограничений поперечному течению металла ( $a=b_3/b_k < 0,95$ , где  $b_3$  – ширина заготовки,  $b_k$  – ширина дна калибра). При этом коэффициент продольной деформации ( $\mu$ ) был равен 1,13. С учетом особенностей принятой схемы деформирования, выполнена постановка расчетного эксперимента по прокатке заготовок с  $\Delta d=20$  мм в прямоугольном калибре по следующим схемам:

- прокатка с начальным поворотом заготовки вокруг ее продольной оси на угол  $\alpha_n$  от 0 до  $6^\circ$ ;
- прокатка с ограничением поворота заготовки вокруг ее продольной оси;
- прокатка без ограничения поворота заготовки вокруг ее продольной оси.

По второму варианту выполняли моделирование процесса прокатки НЛЗ с большой величиной исходной “ромбичности” ( $\Delta d$ ) по действующей в обжимной клетке стана системе сопряженных прямоугольных калибров с коэффициентом продольной деформации ( $\mu$ ) 1,32 и величиной ограничения поперечному течению металла ( $a$ ) 1,04.

Моделирование выполняли при следующих условиях:

- тепловой режим заготовки – нестационарный;
- температура поверхности валков принималась равной  $300^\circ\text{C}$  и не изменялась в процессе прокатки;
- температура нагрева заготовки под прокатку –  $1180 - 1230^\circ\text{C}$ ;
- время транспортировки заготовки от печи к стану – 10 секунд;
- скорость прокатки – 3 м/с;
- материал заготовки – пластический;
- материал прокатных валков – жесткий, недеформируемый.

Поведение материала заготовки в процессе решения описывалось с помощью диаграммы «эквивалентные напряжения – эквивалентные деформации». Реология металла определялась кривой течения в соответствии с заданной зависимостью напряжения течения ( $\sigma$ ) от степени деформации ( $\epsilon$ ), скорости деформации ( $\dot{\epsilon}$ ) и температуры ( $t$ ):

$$\sigma = f(\epsilon; \dot{\epsilon}; t). \quad (1)$$

При моделировании использовалась концепция напряжения течения, в соответствии с которой материал деформируется пластически, а сумма напряжений определяется по кривой течения в зависимости от пошаговой суммы деформаций. Реологические кривые для материала заготовки ( $\%C = 0,42 \dots 0,50$ ;  $\%Mn = 0,17 \dots 0,37$ ;  $\%Si = 0,50 \dots 0,80$ ;  $\%Cr < 0,25$ ) в диапазоне температур  $900 - 1250^\circ\text{C}$  принимали в соответствии с рекомендациями работы [4], а теплофизические свойства стали – по рекомендациям работы [5]. Размеры диагональных трещин (для угла  $>90^\circ$  длина трещины ( $L$ ) равна 12 мм, глубина залегания от поверхности ( $S$ ) – 3 мм; для угла  $<90^\circ$ :  $L = 3$  мм,  $S = 3$  мм) принимались среднестатистическими на основе анализа поперечных теплетов, полученных из заготовок текущего производства, отлитых в условиях скоростной сортовой МНЛЗ (рис. 1).

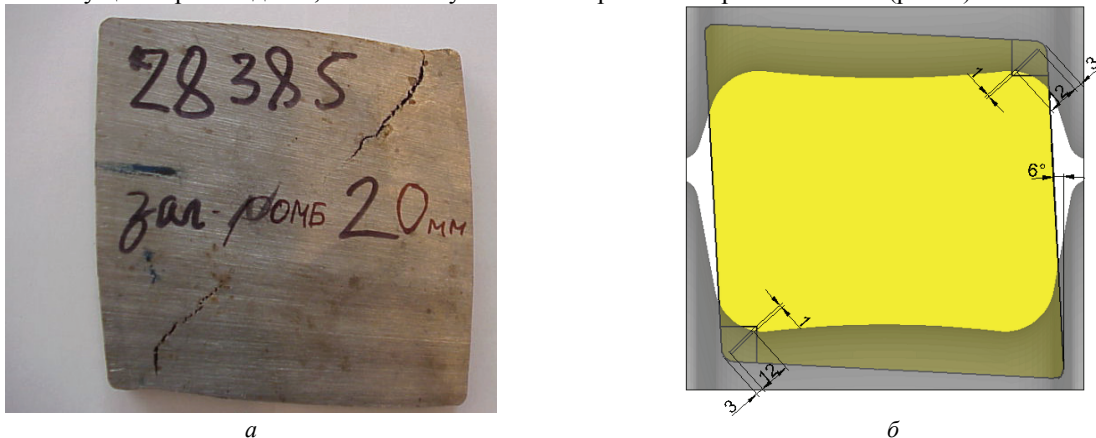


Рис. 1. Внешний вид НЛЗ с дефектом формы “ромбичность” ( $\Delta d = 20$  мм): а – поперечный теплет НЛЗ; б – твердотельная модель заготовки с диагональными трещинами

В качестве модели контактного трения приняли сдвиговую модель трения:

$$\tau_{mp} = m \times k \quad (2)$$

где  $\tau_{mp}$  – напряжение трения;

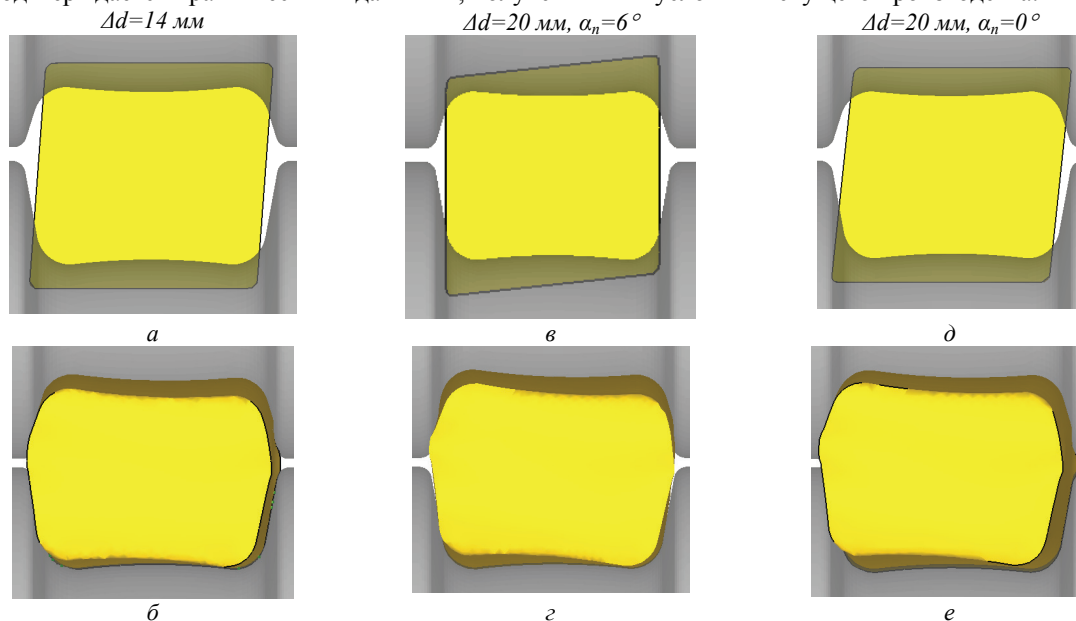
$m$  – фактор трения;

$k$  – предел текучести материала заготовки на сдвиг.

Для условий взаимодействия заготовки с валками при наличии на контактных поверхностях значительного количества окалины и при отсутствии смазки приняли значение  $m$  равным 0,7.

Для корректного описания геометрии заготовки при моделировании использовали, конечно-элементную, сетку с четырехузловыми тетраэдрами. Максимальный размер конечного элемента не превышал 6 мм.

Результаты расчетного эксперимента с использованием разработанной модели показали, что получение качественных подкатов при прокатке НЛЗ с начальной ромбичностью не более 14 мм (рис. 2а) технологически осуществимо. В этом случае искажения формы деформируемой заготовки незначительны (рис. 2б). Данный вывод подтверждается практическими данными, полученными в условиях текущего производства.



**Рис. 2. Результаты численного моделирования процесса прокатки НЛЗ с дефектом формы “ромбичность” в прямоугольном калибре при  $\mu = 1,32$  и  $a = 1,04$  (действующая технология): а – захват валками; б - выброс из валков; в – захват, возможность поворота вокруг продольной оси ограничена; г – выброс из валков, возможность поворота вокруг продольной оси ограничена; д - захват, возможность поворота вокруг продольной оси не ограничена; е - выброс из валков, возможность поворота вокруг продольной оси не ограничена**

Реализация опытов расчетного эксперимента, при котором верхняя и нижняя грани заготовки не параллельны дну калибра (рис. 2в), а возможность поворота заготовки вокруг продольной ограничена, показала, что в этом случае имеет место существенная неравномерность обжатия по ширине заготовки. Это способствует неравномерности вытяжки по поперечному сечению профиля и продольному скручиванию раската (рис. 2г). Данные о величинах углов скручивания подката ( $\alpha^\circ$  – средняя величина двух значений углов скручивания с нижней и верхней сторон заготовки) приведены в таблице.

Таблица

**Углы скручивания заготовки вокруг продольной оси после первого прохода**

Возможность поворота заготовки вокруг продольной оси	$\alpha^\circ$	
	$a < 0,95; \mu = 1,13$	$a = 1,04; \mu = 1,32$
	$\alpha_n = 0^\circ$	
ограничена	4,860°	3,515°
не ограничена	4,188°	3,365°
	$\alpha_n = 2,5^\circ$	
ограничена	6,462°	3,702°
не ограничена	4,106°	3,326°
	$\alpha_n = 6^\circ$	
ограничена	9,195°	3,779°
не ограничена	3,912°	3,429°

Из приведенных данных видно, что наиболее близкая (к регламентированной режимом деформирования и калибровкой валков) форма подката получается при прокатке с  $a=1,04$  и  $\mu=1,32$ . Поэтому на следующем этапе исследований, связанном с изучением поведения диагональных трещин при деформировании, использовали именно такой вариант технологической схемы прокатки.

При моделировании процесса прокатки НЛЗ с дефектом формы “ромбичность” и дефектом макроструктуры “диагональные трещины” дополнительно учитывали остывание заготовки в результате транспортировки от печи к первой клети стана и ее разогрев за счет теплового эффекта пластической деформации. Результаты моделирования представлены на рис. 3.

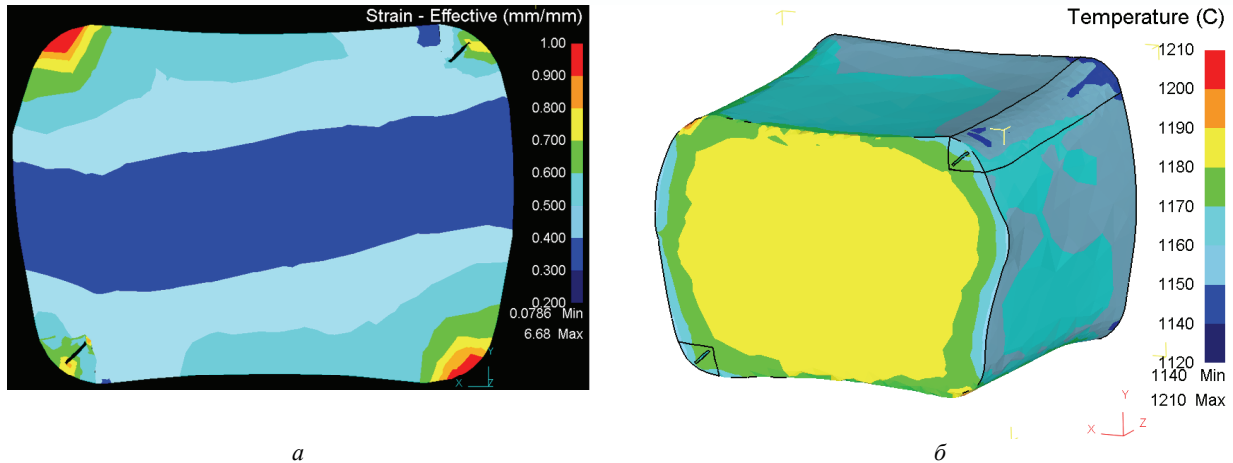


Рис. 3. Распределение эквивалентных деформаций (а) и температуры (б) в поперечном сечении раската после первого прохода (температура заготовки на выходе из печи – 1180°C;  $a=1,04$ ,  $\mu=1,32$ )

Анализ полученных данных показывает (рис.4), что в области углов  $>90^\circ$  при увеличении  $\Delta d$ , при прочих равных условиях, длина дефектов уменьшается: при  $\Delta d = 0$  мм - на 23,6%; при  $\Delta d = 10$  мм - на 28,3%; при  $\Delta d = 20$  мм - на 30,6%. Глубина залегания дефектов также уменьшается: при  $\Delta d = 0$  мм - на 40,3%; при  $\Delta d = 10$  мм - на 32%; при  $\Delta d = 20$  мм - на 29,7% (рис.4). При этом во всех рассмотренных случаях получена требуемая форма подката, а диагональные трещины НЛЗ минимизировались. Случаи выхода трещин на поверхность раската отсутствовали. Результаты моделирования также показали, что для реализации такой технологической схемы необходима дополнительная установка задающего устройства горизонтальной силой  $\sim 700$  кН, обеспечивающего условия динамического захвата без фиксирования поворота заготовки вокруг ее продольной оси.

Схожий характер поведения диагональных трещин при прокатке наблюдали и в острых углах заготовки, в которых величина деформации больше (рис. 3а) и начинается раньше, чем в тупых. Такой характер распределения деформаций в совокупности с высокой температурой прокатки создает предпосылки для заварки трещин сравнительно небольшой протяженности (не более 3 мм).

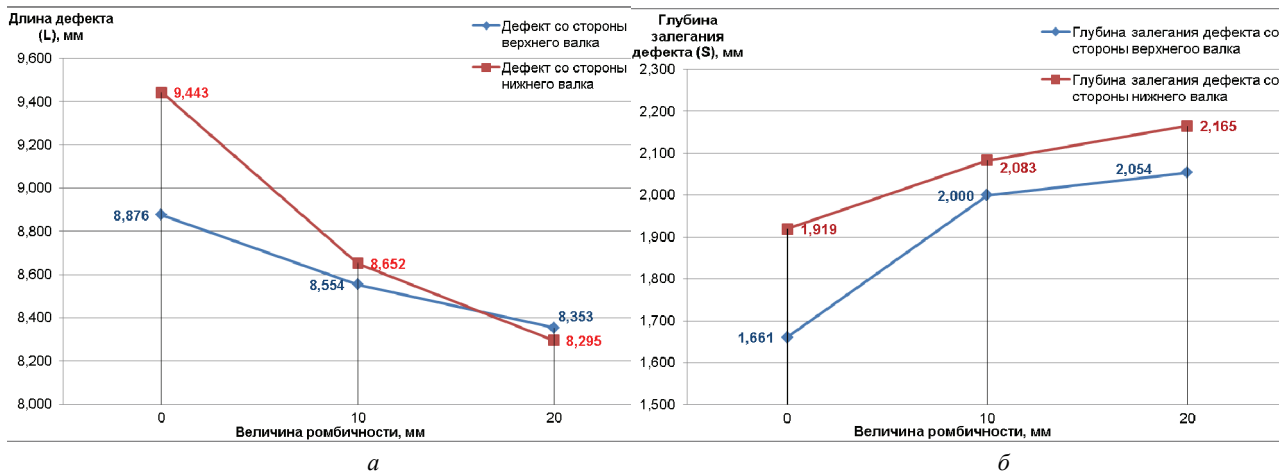


Рис. 4. Формоизменение диагональных трещин НЛЗ после первого прохода: а – изменение длины трещин; б – изменение глубины залегания трещин

Основываясь на выводах работы [6], сделанных по результатам экспериментальных исследований процесса заварки отверстий в стальных образцах при их прокатке, и полученных в настоящей работе результатах математического моделирования, было установлено следующее. Для реализации режима прокатки НЛЗ сечением 135×135 мм, при котором в первом проходе будет получена требуемая форма подката, а диагональные трещины будут частично завариваться без выхода на поверхность раската, необходимо: дополнительно увеличить температуру нагрева НЛЗ перед прокаткой на 50°C (с 1180°C (см. рис. 3б) до 1230°C); вести прокатку в первом проходе с обжатием  $\geq 25,2\%$  (то есть не ниже, чем по действующему регламенту ( $\mu \geq 1,32$ )); снизить скорость прокатки в 8 - 10 раз (с 3 м/с до 0,375 – 0,3 м/с).

Предлагаемый режим прокатки позволяет достичь требуемых [6] для реализации процесса частичной заварки внутренних несплошностей заготовки значений степени, скорости и температуры деформации металла в области диагональных трещин. Кроме того, повышение температуры нагрева металла под прокатку также будет оказывать положительное влияние в части обеспечения стабильного захвата валками НЛЗ, имеющих малые радиусы скругления углов.

### Выводы

Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки НЛЗ сечением 135×135 мм с величиной ромбичности 20 мм в прямоугольном калибре показали следующее. В случае прокатки со свободным уширением и начальным взаимодействием заготовки с калибром лишь в его углах создание условий, при которых исходная заготовка самоустанавливается в калибре, обеспечивает более равномерное обжатие по ширине полосы с верхней и нижней ее сторон. Это позволяет избежать скручивания заготовки вокруг ее продольной оси и создает предпосылки для получения необходимой формы подката.

Установлено, что наилучший эффект исправления дефекта формы «ромбичность» достигается при стесненном уширении ( $a = 1,04$ ) и большей величине вытяжки ( $\mu = 1,32$ ). В этом случае размеры и глубина залегания диагональных трещин в области углов  $>90^\circ$  при прочих равных условиях уменьшаются. Трещины при этом не выходят на поверхность раската. Расчеты показали, что для реализации такой технологии необходимы условия динамического захвата НЛЗ с горизонтальной силой  $\sim 700$  кН без фиксирования поворота заготовки вокруг ее продольной оси.

Также установлено, что для достижения эффекта частичной заварки трещин необходимо дополнительно увеличить температуру нагрева НЛЗ перед прокаткой с 1180 до 1230°C, а деформирование в первом проходе необходимо осуществлять с высотным обжатием  $\geq 25,2\%$  при одновременном максимально возможном снижении скорости прокатки (исходя из стойкости к разгару поверхности ручьев).

**Анотація.** Методом комп'ютерного кінцево-елементного моделювання виконано аналіз процесу прокатки безперервнолітої заготовки перерізом 135 × 135 мм з дефектом форми «ромбічність» в обтискних калібрах прямокутної форми для умов типового лінійного середньосортного стану з діаметром валків 500 - 600 мм за діючими деформаційно-швидкісним і температурним технологічними регламентами. Виконано обґрунтування режимів прокатки, що забезпечують гарантоване захоплення заготовки валками, отримання необхідної форми підкату і мінімізацію або часткову заварку діагональних тріщин без виходу їх на поверхню розкату.

**Ключові слова:** безперервноліта заготовка, ромбічність, діагональні тріщини, прокатка, прямокутний калібр, форма підкату

**Abstract. Purpose.** The purpose of the present investigation is technological capability evaluation of obtaining of high quality semi-finished rolled products from uninterruptedly-casted billets with great value of the «rhomboidity» and «diagonal cracks» without reaching the surface of billet.

**Design/methodology/approach.** The finite element method is used as a method of investigation. The mathematical model realization is executed using the software DEFORM 3D. The validation of the finite element model is executed according to the actual data of metal forming of uninterruptedly-casted billets with cross-section 135×135 mm in breakdown mill of linear medium-section mill with diameter of forming rolls 500 – 600 mm according to the acting strain-rate and temperature technological regulations. Billets with different value of the initial «rhomboidity» ( $\Delta d$ ) were rolled in the course of the experimental-industrial rolling. During the execution of calculated investigation with the help of the developed mathematical model, two variants of the deformation schemes were examined. The first variant is based on the well-known scheme of rolling on the flat body of forming rolls. The difference consists in the fact that instead of rolling on the flat body, rolls were used with box passes. The function of box passes consists in prevention the loss of billet stability (dumping) at the expense of fixation (clamping) only in the corners of the pass (the corners between the base of a groove and outlet of pass) and limitation absence of the transverse flow of metal. According to the second variant, the mathematical simulation of uninterruptedly-casted billets rolling process is executed according to the operating roll pass design of breakdown mill. The realization of calculated experiment, which provides for different variants of billet rolling with value of the «rhomboidity» 20 mm in box pass with billet rotation along the longitudinal axis with limited rotation possibility and without it, is executed. The mathematical simulation for non-stationary thermal conditions of billet is executed. Rheological curves and thermophysical properties of steel (%C = 0,42...0,50; %Mn = 0,17...0,37; %Si = 0,50...0,80; %Cr < 0,25) are accepted in accordance with reference data. Dimensions of the «diagonal cracks» are accepted on the basis of an average statistical data of the template

cross-section analysis, obtained from the billets of current production, casted in the conditions of high-speed continuous casting machine.

**Findings.** The character of metal forming in the course of uninterruptedly-casted billet rolling with great value of the «rhomboicity» and «diagonal cracks» is determined. The technological regimes of rolling, providing a guaranteed roll bite, obtaining required shape of semi-finished rolled products and minimization or partial welding of the «diagonal cracks» without reaching the surface of feed is defined.

**Value.** Results of this paper have perspective of practical application, provided improvement of production technology of rolled section steel of uninterruptedly-casted metal, on linear rolling mills and on modern continuous rolling mills.

**Keywords:** Uninterruptedly-Casted Billet, Romboicity, Diagonal Cracks, Rolling, Box Pass, The Shape Of Feed

1. *Ботников С.А.* Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла – Волгоград, 2011. – 97с.
2. *Великий А.Б.* Исследование причин искажения профиля сортовой непрерывнолитой заготовки / А.Б. Великий, В.П. Филиппова, П.С. Монастырский и др. // Литейные процессы: Межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск, 2008. – Вып. 7. – С. 152 – 157.
3. *Пат.2278746* Российская Федерация, МПК В21 В1/12. Способ горячей прокатки сортовых профилей / С.И. Платов, А.А. Макачук, Д.В. Терентьев, А.В. Анцупов, В.Н. Урцев; Общество с ограниченной ответственностью «ПРОМИС».- N2004113152/02; заявл.29.04.2004; опубл.27.06.2006.
4. *Полухин П.И.* Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1976. – 488 с.
5. *Казанцев Е.И.* Промышленные печи: (Справочное руководство для расчетов и проектирования)/ Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368с.
6. *Wang A.* A study of pore closure and welding in hot rolling process / A.Wang, P.F.Thomson, P.D. Hodgson // Journal of Materials Processing Technology. 1996. – Vol. 60. – p. 95-102.

#### REFERENCES

1. *Botnikov S.A.* Sovremennij atlas defektov nepreryvnoitoj zagotovki i prichiny voznikovenija proryvov kristallizujuwejsja korochki metalla (The modern atlas of uninterruptedly-casted billet defects and causes of crystallizing metals crust's breakouts). Volgograd, 2011. 97 p.
2. *Velikij A.B., Filippova V.P., Monastyrskij P.S.* and other. Issledovanie prichin iskazhenija profilja sortovoj nepreryvnoitoj zagotovki Litejnye processy: Mezhhregion. sb. nauch. tr. (The Research of the causes of distortion of profile of sectional uninterruptedly-casted billet. Casting processes: inter-regional the collection of proceedings). Magnitogorsk, 2008, Vol. 7, pp. 152 – 157.
3. *Platov S.I., Makarchuk A.A., Terentev D.V., Ancupov A.V., Urcev V.N.* Sposob gorjachej prokatki sortovyh profilej [The method of hot rolling of sectional profiles]. Patent Russian Federation no. 2278746.
4. *Poluhin P.I., Gun G.Ja., Galkin A.M.* Soprotivlenie plasticheskoj deformacii metallov i splavov [Resistance to plastic deformation of metals and alloys]. Moscow: Metallurgy, 1976. 488 p.
5. *Kazancev E.I.* Promyshlennye pechi (Industrial furnaces). Moscow: Metallurgy, 1975. 368 p.
6. *Wang A., Thomson P.F., Hodgson P.D.* Journal of Materials Processing Technology. 1996, Vol. 60, pp. 95-102.