

СНИЖЕНИЕ ИСКАЖЕНИЙ ФОРМЫ ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ НА СОРТОВЫХ НОЖНИЦАХ

Проанализированы дефекты резки квадратных профилей сортовыми ножницами, рассмотрены способы повышения точности геометрии торцевой поверхности заготовки. На основе разработанной математической модели процесса поперечной резки непрерывнолитой заготовки гидравлическими ножницами установлено влияние углов, определяющих положение режущих поверхностей ножа, на искажение формы приторцевой зоны заготовки. Получены регрессионные зависимости относительных показателей утяжки (смятия) концов и симметричности сечения профиля, на основании которых обоснован выбор рациональных значений углов раскрытия и заострения режущих кромок фасонных ножей.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, сортовой металлопрокат, фасонные (фигурные) ножи, сортовые ножницы, утяжка (смятие) концов заготовки, симметричность профиля, квадрат, режущая кромка ножа, угол раскрытия, угол заострения.

Постановка проблемы

Производство сортового металлопроката предполагает наличие специального оборудования, устанавливаемого в потоке прокатного стана или машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с целью реализации разделительных операций, применяемых для резки продукции на мерные длины. Сдерживающим фактором широкого применения ножниц для поперечного разделения непрерывнолитых заготовок, сортового и, особенно, фасонного металлопроката является неуниверсальность режущего инструмента, а также возможность появления дефектов резки, снижающих качество и увеличивающих затраты на доотделку прокатной продукции.

Анализ последних исследований и публикаций

К качеству разделения сортового проката предъявляют следующие основные требования [1...4]: соблюдение заданной точности по длине; обеспечение прямого реза; предотвращение образования значительных заусенцев; реализация порезки проката без существенного смятия концов. Точность поперечной резки сортового проката и допустимая величина косины реза регламентируются ГОСТ 535-2005, ГОСТ 8559-75, ГОСТ 2591-88. Методы контроля отклонения формы металлопродукции представлены в ГОСТ 26877-91. Применительно к порезке сортовой заготовки на мерные длины наиболее значимыми дефектами являются заусенцы или завал

кромки и смятие концов раската, регламентируемые ГОСТ 21014-88 «Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности» и ГОСТ 535-2005 «Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия». В зависимости от условий поставки и требований нормативных документов при прокатке допускается смятие торцов заготовки до 25 % высоты поперечного сечения или смятие конца на длине 20 мм от края, либо, в случае более жестких требований по качеству, смятие концов заготовки не допускается. Несмотря на то, что указанные дефекты образуются на этапе обработки полуфабриката (например, блюма) они могут значительно повлиять на технологию производства сортовых профилей на финальном этапе [3].

В литературе [1,2] для обозначения смятых концов сортовой заготовки используются близкие по значению термины «утяжка концов», «утяжина», «отпечаток ножей», которые определяют дефекты, образованные в результате внеконтактной (утяжка) и контактной (отпечаток ножей) пластической деформации в приторцевой зоне заготовки.

Очевидно, что наряду с технологическими параметрами разделительного процесса выбранным способом резки [1] (открытая, не полностью открытая, закрытая) и конструктивным исполнением ножниц [5...7] профилировка рабочей поверхности фигурных ножей оказывает существенное влияние на формоизменение заготовки в зоне резки. При этом, важное значение имеют

форма ножа и углы, определяющие положение режущих кромок: угол между режущими кромками ножа α и угол заострения β .

Оригинальное решение использовано в схеме установки возвратно-поступательных ножниц [5] сортовой машины непрерывного литья заготовок Филиала №2 «Енакиевский металлургический завод» ЗАО «Внешторгсервис» (ЕМЗ), благодаря которому удалось снизить искажение формы приторцевой зоны квадратных профилей за счет учета формы сечения и придания ему наиболее рациональной ориентации относительно направления реза и движения фасонных ножей.

Очевидно, что существует связь между углом раскрытия режущих кромок ножа α и ромбичностью формы торцевой зоны (концов) заготовки. Однако применение ножей с углом $\alpha < 90^\circ$ не получило широкого распространения. В свою очередь, в работе [8] отмечается, что увеличение угла β ухудшает качество среза, увеличивая зону смятия, поэтому рекомендуется принимать значения угла β в диапазоне $3...5^\circ$, а для резки штучных заготовок применять угол $\beta = 5...15^\circ$ [9].

Из вышеизложенного следует, что варьирование значениями углов α и β оказывает существенное влияние на форму торцевой поверхности разрезаемой заготовки, а также обуславливает качество ее порезки, но сведения по выбору параметров режущего инструмента сортовых ножниц блюмовой МНЛЗ в рассмотренной литературе противоречивы и теоретически недостаточно обоснованы.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является исследование показателей неточности, определяющих искажение торцевой поверхности профиля в зоне реза, а также повышение степени научной обоснованности выбора параметров и совершенствование конструкции режущего инструмента сортовых ножниц поперечной резки квадратных заготовок.

Основной материал исследования

Экспериментальные исследования процессов горячей резки металла затрудняются сложностью доступа в зону реза и действием в ней высоких температур, в свою очередь альтернативой зачастую дорогостоящим физическим моделям может служить разработка математической модели процесса поперечной резки заготовки фасонными ножами. С этой целью была решена трехмерная задача, базирующаяся на методе конечных элементов [10,11]. Расчеты выполнены применительно к ножницам сортовой МНЛЗ ЕМЗ [5], в которых станина развернута на угол 45° относительно горизонтали (рис. 1).

Напряженно-деформированное состояние заготовки на различных этапах сближения ножей представлено на рис. 2. Сечение заготовки 120×120 мм (сторона квадрата $h=120$ мм), материал – сталь 20, температура 970°C , скорость резки 70 мм/с. Ножи имеют фасонную форму (рис. 1) с углом при вершине $\alpha=94^\circ$ и уклоном режущей кромки $\beta=7^\circ$.

Адекватность математической модели проверялась путем сопоставления формы торцевой поверхности, полученной по результатам моделирования, с формой фактического среза заготовки и максимального значения силы резки с ранее полученными экспериментальными данными [12], расхождение при этом не превысило 5% .

С целью оценки влияния профилировки ножей на формообразование заготовки в зоне реза и выявления типовых дефектов разделительной операции были выполнены симуляции процесса с ножами различной конфигурации. Изменяли угол между режущими кромками ножа α (среднее значение $\alpha_{cp}=92^\circ$, диапазон варьирования $\alpha_{cp}=\pm 6,5\%$) и угол заострения β ($\beta_{cp}=3,5^\circ$, диапазон варьирования $\beta_{cp}=\pm 100\%$), что видоизменяло форму торцевой поверхности заготовки после резки. В результате были получены профили торцевой поверхности заготовки, которые представлены на рис. 3.

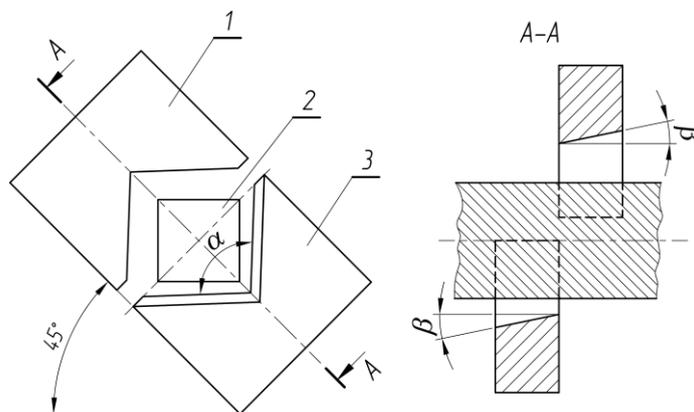


Рис. 1. Схема установки гидравлических ножниц сортовой МНЛЗ: 1 – разрезаемая заготовка; 2, 3 – фасонные ножи

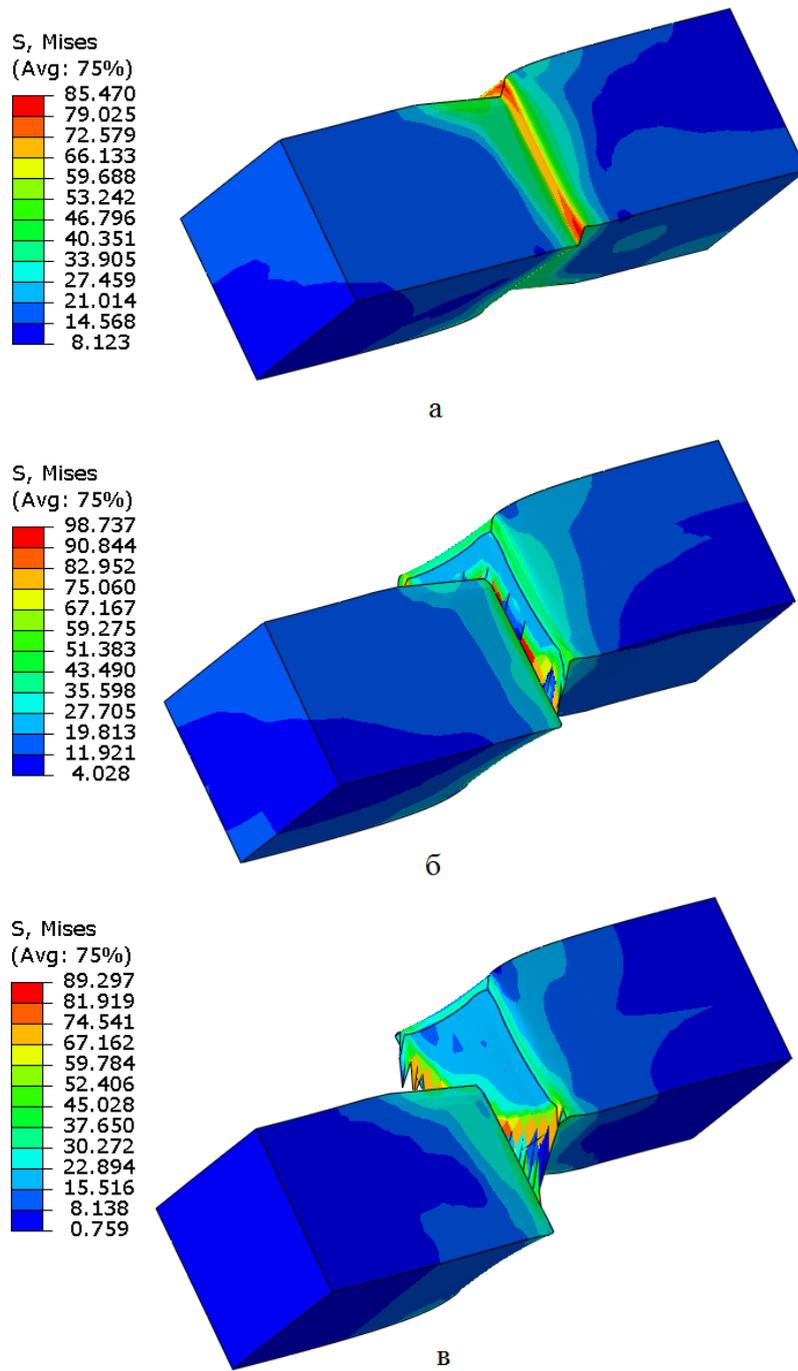


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние заготовки на различных этапах сближения ножей:
 а – 35 мм; б – 70 мм; в – 105 мм

Искажения профиля и точность размеров сечения разрезаемой заготовки обусловлены выбранным способом разделения и характеризуются следующими геометрическими параметрами (табл. 1): Δ – диагональю квадрата (номинальная величина вертикальной Δ_v и горизонтальной Δ_g диагоналей равна $h\sqrt{2}$); b – смещением центра пересечения диагоналей разрезаемого сечения от верхнего ребра заготовки; c, d – расстояниями, определяющими симметричность сечения по вертикали, а также абсолютными величинами утяжки $f=b-d$ и смя-

тия $e=\Delta-b-c$ концов заготовки (рис. 4).

Известно, что применение фасонных ножей при разделении ножницами квадратных профилей по диагонали позволяет полностью устранить раздав концов разрезаемой заготовки [3], но не исключает ромбичности и смятия (утяжки) ее концов. Для оценки степени разброса значений показателей неточности формы сечения были введены относительные параметры [13]: ромбичности $k_\Delta=\Delta_g/\Delta_v$; симметричности сечения по вертикали $k_{cd}=c/d$; утяжки (смятия) концов заготовки $k_f=f/e$.

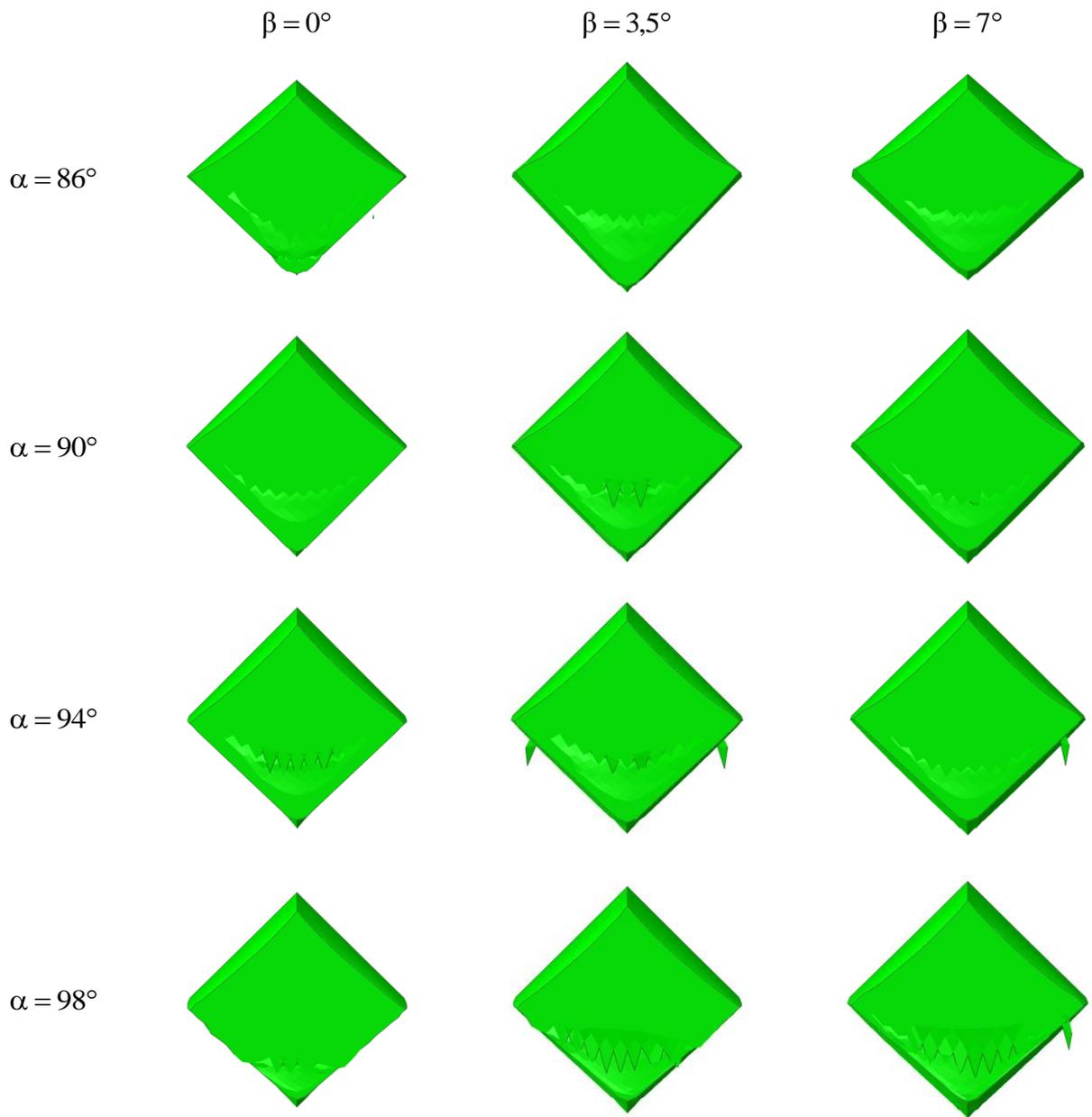


Рис. 3. Профили торцевой поверхности заготовки после резки, полученные по результатам моделирования при различных значениях углов α и β , определяющих положение режущих кромок фасонного ножа

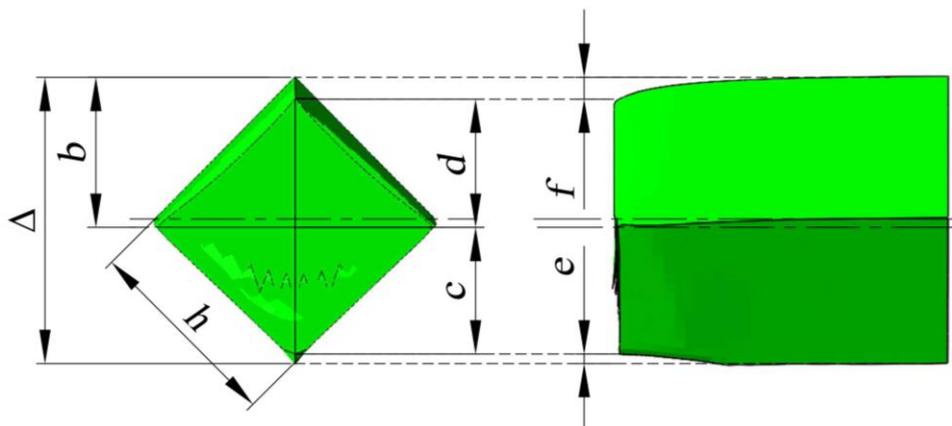


Рис. 4. Схема замеров геометрических параметров торцевой поверхности заготовки после резки на ножницах

По каждому измеряемому и расчетному параметру, представленному в табл. 1, определены среднее, минимальное, максимальное значение и коэффициент вариации v . Установлено, что изменение в указанных диапазонах углов α и β сопровождается существенным разбросом полученных значений. При этом наиболее однородно (диапазон варьирования минимален: 0,904...0,968, $v=2,52\%$) распределены результаты вычисления коэффициента k_{Δ} , обуславливающего ромбичность сечения, а также существует тесная связь (коэффициент парной линейной корреляции $r=0,93$) между величиной угла раскрытия режущих кромок ножа α и показателем ромбичности профиля торцевой зоны заготовки k_{Δ} , причем по мере увеличения угла α ромбичность профиля возрастает.

Следующим параметром, характеризующим искажения формы сечения, сопровождающимся разбросом значений от 0,9 до 1,27, $v=1,72\%$, является коэффициент симметричности профиля k_{cd} , величина которого в значительной степени ($r=-0,98$) определяется углом раскрытия режущих кромок ножа α , причем по мере увеличения угла α отношение c/d уменьшается. Наибольшему разбросу результатов соответствует распределение коэффициента k_f , обуславливающего степень утяжки (смятия) концов разрезаемой заготовки $k_f=1,14...5,74$, $v=60,67\%$, величина которого в определенной степени ($r=-0,66$) зависит от угла заострения режущих кромок ножа β , причем по мере увеличения угла β отношение f/e уменьшается.

Полученный по данным табл. 1 диапазон изменения величины утяжки концов заготовки составил $f=11,14...14,67$ мм, а смятия – $e=2,26...11,48$ мм. Согласно данным [8], допускаемые искажения (утяжка и смятие) концов заготовок толщиной 120 мм не должны быть более 10 мм, что свидетельствует о необходимости повышения качества резки сортовых заготовок фасонными ножами [14].

Для определения рациональных значений углов α_p и β_p , на основании метода наименьших квадратов по данным, представленным в табл. 1, были получены регрессионные зависимости показателей неточности, определяющих искажение (сминание) торцевой части заготовки в зоне реза, k_f, k_{cd} в функции углов α и β :

$$k_f = (21274,51 - 197,86\alpha - 2890,39\beta + 28,81\alpha\beta) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

$$k_{cd} = (-10991,75 + 225,77\alpha - 191,49\beta + 1,41\alpha\beta) \cdot 10^{-4}. \quad (2)$$

Разница в значениях параметров k_f и k_{cd} , по результатам симуляций и рассчитанных по регрессионным зависимостям (1) и (2) составила менее 15 %, что указывает на адекватность полученных выражений. При этом показатель ромбичности k_{Δ} изменился незначительно (увеличился на 1,55 %).

С учетом требований качества реза квадратных заготовок фасонными ножами предпочтительно принять $k_f=k_{cd}=1,0$. Графически область определения указанных зависимостей являются уравнения плоскости: $k_f=f(\alpha, \beta)$, $k_{cd}=f(\alpha, \beta)$, совместным решением которой является уравнение прямой m в пространстве, описываемое следующим выражением:

$$m = \begin{cases} (2127451 - 197,86\alpha - 2890,39\beta + \\ + 28,81\alpha\beta) \cdot 10^{-3} = 1,0, \\ (-10991,75 + 225,77\alpha - 191,49\beta + \\ + 1,41\alpha\beta) \cdot 10^{-4} = 1,0. \end{cases} \quad (3)$$

Частным решением системы уравнений (3) являются координаты точки $(\alpha_p, \beta_p, 1,0)$, расположенной в месте пересечения указанных плоскостей с горизонтальной плоскостью уровня 1,0. В результате были определены рациональные значения углов наклона режущих кромок фасонного ножа, которые составили $\alpha_p=95,5^\circ$, $\beta_p=10^\circ$ (рис. 5).

Любые другие точки, находящиеся на прямой m , не будут соответствовать требованиям качества реза. Например, для исследуемого диапазона углов β с учетом (3) предельные значения относительных параметров k_f и k_{cd} равны между собой ($k_f=k_{cd}$) и составляют 1,096 ($\beta=0^\circ$) и 0,942 ($\beta=15^\circ$), что соответствует отклонению на 9,6 и 5,8 % от оптимального значения и будет увеличивать степень выраженности рассматриваемых дефектов резки квадрата.

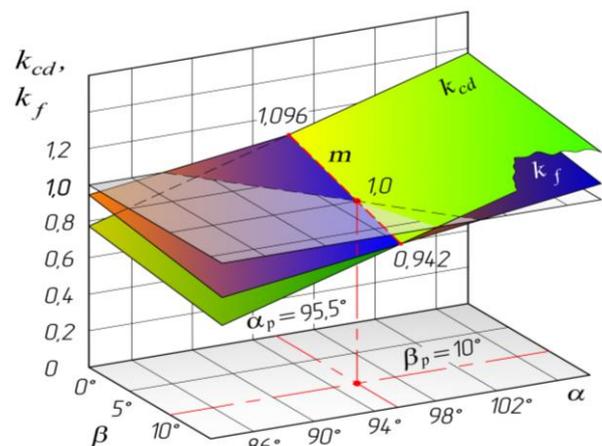


Рис. 5. К определению рациональных значений углов α и β

Табл. 1. Результаты замеров геометрических параметров по схеме на рис. 4

№ п/п	α	β	Δ_B	Δ_r	Δ_B / Δ_r	b	c	d	c/d	f	e	f/e
	град.	град.	мм	мм	-	мм	мм	мм	-	мм	мм	-
1	86	0	154,58	159,87	0,967	83,34	84,72	70,36	1,2	12,98	2,26	5,74
2	86	3,5	154,17	159,24	0,968	80,8	84,19	69,22	1,22	11,58	5,15	2,25
3	86	7	150,95	158,25	0,954	78,03	84,07	66,21	1,27	11,82	7,9	1,5
4	90	0	154,73	160,38	0,965	86,01	79,17	74,87	1,06	11,14	4,65	2,4
5	90	3,5	151,45	159,66	0,949	84,06	78,61	72,08	1,09	11,98	7,39	1,62
6	90	7	149,29	159,02	0,939	81,81	78,46	69,93	1,12	11,88	9,74	1,22
7	94	0	151,25	160,88	0,94	88,68	74,30	75,90	0,98	12,78	6,86	1,86
8	94	3,5	149,31	160,56	0,93	87,04	74,17	74,07	1	12,97	8,7	1,49
9	94	7	147,57	160,63	0,919	84,96	74,14	72,63	1,02	12,33	10,81	1,14
10	98	0	149,9	164,09	0,914	93,68	71,12	79,02	0,9	14,66	5,06	2,9
11	98	3,5	146,68	162,26	0,904	91,39	70,20	76,72	0,92	14,67	8,29	1,77
12	98	7	145,27	160,64	0,904	89,06	70,02	75,42	0,93	13,64	11,48	1,19
Ср. знач.	92	3,5	150,43	160,46	0,94	85,74	76,93	73,04	1,06	12,7	7,36	2,09
Min	86	0	145,27	158,25	0,904	78,03	70,02	66,21	0,9	11,14	2,26	1,14
Max	98	7	154,73	164,09	0,968	93,68	84,72	79,02	1,27	14,67	11,48	5,74
$v, \%$	5,08	85,28	2,04	0,96	2,52	5,27	7,05	5,00	11,72	9,06	36,94	60,67

Выводы

Выбранный способ резки обуславливает искажения профиля и точность размеров сечения разрезаемой заготовки. Наличие указанных недостатков обработки квадратной заготовки оказывает отрицательное влияние при производстве из них в дальнейшем простых сортовых и фасонных профилей.

Определены геометрические параметры и основные показатели, характеризующие искажение формы торцевой поверхности непрерывнолитой заготовки в процессе поперечной резки на сортовых ножницах.

Подтверждена высокая степень взаимосвязи ромбичности сечения k_{Δ} и коэффициента симметричности профиля k_{cd} с углом раскрытия режущих кромок ножей α .

Установлена связь между степенью утяжки (смятия) k_f концов разрезаемой заготовки и углом заострения режущих кромок ножа β . Получены соответствующие регрессионные зависимости.

Использование фасонных ножей новой конструкции с углами наклона режущих кромок $\alpha_p=95,5^\circ$, $\beta_p=10^\circ$ позволяет повысить симметричность профиля и снизить отношение утяжки концов заготовки к их смятию по отношению к показателям действующей конструкции ножей.

При этом ромбичность профиля увеличится незначительно.

Список литературы

1. Соловцов, С.С. Безотходная резка сортового проката в штампах. – М.: Машиностроение, 1985. – 175 с.
2. Трофимчук, В.Д. Дефекты прокатной стали и меры борьбы с ними. – М.: Металлургия, 1954. – 632 с.
3. Петров, П.А. Повышение качества обработки сортовых заготовок / Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства: Сб. тезисов докл. IV Междунар. науч.-тех. конф. 17 октября 2019 г. // Под общ. ред. В.А. Козачишена. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР ДонГТУ, 2019. – С. 38-41.
4. Siddhartha, Ray. Principles and Applications of Metal Rolling. – Cambridge University Press, 2016. – 320 p.
5. Пат. 13090 Украина, МПК В23D 25/00 В23D 25/04. Ножницы для резки заготовки, которая двигается / В.П. Багнови др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Ново-краматорский машиностроительный завод». – № U200508886; заявл. 19.09.2005;

опубл. 15.03.2006.

6. Пат. 4385538 США. МКИ В26D 5/02, В22D 11/126. Shearing device for cutting bar-shaped stock such as rolled steel billets / Hans Bieri, Karl Rimmele; заявитель и патентообладатель Mecapex S.A., Switzerland. – №06/237,847; заявл. 24.02.1981; опубл. 31.05.1983.
7. Ульяницкий, В.Н. Влияние формы сечения и расположения сортового металлопроката на энергосиловые параметры резки фасонными ножами / В.Н. Ульяницкий, П.А. Петров // Вестник ДонНТУ. Специальный выпуск «Металлургические процессы и оборудование». – 2016. – №4 (4). – С. 45-49.
8. Ковка и объемная штамповка стали. Справочник в 2-х т. / Под ред. д-ра техн. наук М.В. Сторожева. Том 1. – изд. 2-е, перераб. – М.: Машиностроение, 1967. – 435 с.
9. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Под ред. Е.И. Семенова. Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. – М.: Машиностроение, 1985. – 568 с.
10. Liu, G.R. The Finite Element Method: A Practical Course / G.R. Liu, S.S. Quek. – 2nd Edition. – Butterworth-Heinemann, 2013. – 436 p.
11. Боровик, П.В. 3-D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывно-литых сортовых заготовок / П.В. Боровик, П.А. Петров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2013. – Вып.41. – С. 151-155.
12. Теоретические и экспериментальные исследования процесса горячей поперечной резки непрерывнолитых сортовых заготовок / А.В. Сатонин [и др.] // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля, 2012. – С. 3-10.
13. Петров, П.А. Обоснование параметров и совершенствование конструкции ножей поперечной резки сортового проката: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13 / Петров Павел Александрович. – Донецк, 2017. – 22 с.
14. Петров, П.А. Оценка влияния способа поперечной резки сортовых заготовок на технологические и экономические показатели прокатного производства // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 24-25 мая 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Т.3. – С. 31-34.

P.A. Petrov /Cand. Sci. (Eng.)/
Donbas State Technical University (Alchevsk)

**THE REDUCTION OF SHAPE DISTORTION OF THE END SURFACE
 OF CONTINUOUSLY CAST BILLETS WHEN CROSS-CUTTING
 ON VARIETAL SHEARS**

Background. *Quality separation of rolled metal into measured lengths is an important and responsible task of modern production of continuous cast billets, as well as the creation of simple varietal and shaped profiles. It is known that cross-cutting operations are the final steps in the technological chain of production of complex metal products. Still, defects formed at the processing stage of semi-finished products (for example, blooms) can significantly affect the production technology of long profiles at the final step. In this regard, clarification of the technological capabilities of the operated and newly designed equipment for the separation of rolled metal products and continuously cast billets is one of the critical and urgent tasks.*

Materials and/or methods. *Based on the finite element method, a mathematical model of the process of cutting square billets with shaped knives developed. Simulations of the process with knives of various configurations were performed to assess the effect of knife profiling on the shape of the billet in the cutting zone. Concerning the process of cross-cutting on long shears, geometric parameters were measured, and the main indicators of distortion of the shape of the end surface of a continuously cast billet were determined, based on which regression equations compiled.*

Results. *Based on the developed technique, we have performed a simulation of the cutting process. Regression dependences of the symmetry coefficients of the profile and the tightening (crumpling) of the ends of the cut billet obtained. The relationship established between the degree of distortion of the end surface shape of a continuously cast billet and the angles of opening and sharpening of the cutting edges of the knife. Rational values of the angles of inclination of the cutting edges of the shaped knife are determined.*

Conclusion. *The obtained cross-sections of the end part of the billet after cutting confirm that the shaping of the end surface significantly depends on the configuration of the knife and the selected cutting method. The use of new design shaped knives will increase the symmetry of the profile and reduce the ratio of the tightening of the ends of the billet to their crumpling. The obtained results recommended for use in making design and technological decisions in the issues of hot separation of a continuously cast square billet with shaped knives into an angle.*

Keywords: *continuously cast billet, rolled metal, shaped knives, varietal shears, tightening (crumpling) the ends of the billet, the symmetry of the profile, square, cutting edge of the knife, opening angle, sharpening angle.*

Сведения об авторе

П.А. Петров

SPIN-код: 2439-7280
 Телефон: +380 (72) 102-07-86
 Эл. почта: pavelpetrov@list.ru

Статья поступила 06.05.2020 г.

© П.А. Петров, 2020

Рецензент д.т.н., проф. А.В. Яковченко