

Список літератури: 1. *Martinez M., Viguier B., Maugis P., Lacaze J.* Relation between composition, microstructure and oxidation in iron aluminides // *Intermetallics*. – 2006. – Vol. 14, No. 10–11. – P. 1214–1220. 2. *Deevi S. C., Sikka V. K.* Nickel and iron aluminides: An overview on properties, processing, and applications // *Intermetallics*. – 1996. – Vol. 4, No. 5. – P. 357–375. 3. *Song H., Wu Y., Tang C., Yuan S., Gong Q., Liang J.* Microstructure and Mechanical Properties of FeAl Intermetallics Prepared by Mechanical Alloying and Hot-Pressing // *Tsinghua science and technology*. – 2009. – Vol. 14, No. 3. – P. 300–306. 4. *Cohron J. W., Lin Y., Zee R. H., George E. P.* Room-temperature mechanical behavior of FeAl: Effects of stoichiometry, environment, and boron addition // *Acta Mater.* – 1998. – Vol. 46, No. 17. – P. 6245–6256. 5. *Wang J., Xing J., Qiu Z., Zhi X., Cao L.* Effect of fabrication methods on microstructure and mechanical properties of Fe₃Al-based alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 488. – P. 117–122. 6. *Szczepanik S., Godlewska E., Mania R.* Materiały Fe-Al otrzymane z proszków // *Kompozyty (Composites)*. – 2002. – Vol. 2, No. 4. – P. 242–248. 7. *Grosdidier T., Ji G., Bernard F., Gaffet E., Munir Z. A., Launois S.* Synthesis of bulk FeAl nanostructured materials by HVOF spray forming and spark plasma sintering // *Intermetallics*. – 2006. – Vol. 14, No.10/11. – P. 1208–1213. 8. *He Q., Jia C., Meng J.* Influence of iron powder particle size on the microstructure and properties of Fe₃Al intermetallics prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Materials Science and Engineering A*. – 2006. – Vol. 428, No. 1-2. – P. 314–318.

Надійшла (received) 25.10.2014

УДК 621.967.3 : 621.98.04

П. В. БОРОВИК, канд. техн. наук, доц., докторант, ДГМА, Краматорск;
М. Е. СЕЛЕЗНЕВ, аспірант, ДонГТУ, Алчевск

ОЦЕНКА СКОРОСТИ РЕЗКИ ЛИСТА ДИСКОВЫМИ НОЖАМИ

На базе метода конечных элементов и программного комплекса ABAQUS выполнено моделирование процесса резки листов дисковыми ножами на примере четырех марок стали (сталь 20, 65Г, 75, 15ХСНД) и проведен теоретический анализ влияния силовых и кинематических параметров на скорость резки. Разработан алгоритм расчета скорости резки листов дисковыми ножами. Определена величина установившейся скорости резки при отсутствии сил внешнего сопротивления, а также выполнена оценка влияния коэффициента трения и сил внешнего сопротивления на величину скорости.

Ключевые слова: скорость резки, лист, дисковые ножи, силы внешнего сопротивления.

Введение. Возрастание спроса на продукцию листопрокатного производства повышает актуальность работ, направленных на совершенствование процесса производства, а также повышения качества горячекатаного толстого листа и расширения технологических возможностей существующего и вновь проектируемого оборудования.

Известны схемы расположения оборудования листовых прокатных станов [1–3], в которых операция резки производится на дисковых ножницах. При этом с целью расширения сортамента, процесс резки может осуществляться в холодном и горячем состоянии [4].

Анализ последних исследований и литературы. Одним из недостатков в работе известных дисковых ножниц является возможность появления серповидности листа при резке, что снижает качество готовой продукции. В практике проектирования дисковых ножниц существует ряд технических решений направленных, в том числе, на устранение данного явления [5–7].

Эффективное внедрение различных технических решений требует развития и совершенствования методов расчета энергосиловых и кинематических параметров процесса резки дисковыми ножами. При этом, учитывая организационные и финансовые сложности экспериментальных исследований, а также стремительное развитие подходов теоретических исследований и рост возможностей современной вычислительной техники, целесообразным является применение математического моделирования данного процесса на базе метода конечных элементов (МКЭ) [8], что позволит расширить представление о протекании процесса.

Цель исследования, постановка проблемы. Целью данной работы является теоретический анализ на базе метода конечных элементов процесса резки дисковыми ножами толстолистовых раскатов и разработка алгоритма расчета скорости его движения.

Материалы исследований. В основу данной работы были положены теоретические исследования процесса резки дисковыми ножами на базе конечно-элементной математической модели в среде программного комплекса ABAQUS предложенной в работе [9].

Для трех марок стали 20, 65Г и 75 при температуре разрезаемого металла 700°C, в ходе моделирования толщина разрезаемого листа составила 50 мм, ширина листа – 1200 мм, ширина отрезаемой кромки – 50 мм, диаметры дисков ножей – 1000 мм, толщина ножей – 100 мм, диаметр роликов – 100 мм. Также моделировали еще одну марку стали (15ХСНД) в холодном состоянии с пределом прочности $\sigma_b = 530$ МПа, при толщине разрезаемого листа 35 мм.

Учитывая мировой опыт проектирования и эксплуатации ножниц, в рассматриваемой модели ось центров дисков ножей наклонена на 9° по направлению движения листа в процессе резки. Кроме того, верхний диск повернут относительно вертикали на 30' так, чтобы по мере движения листа расстояние между дисками увеличивалось. И, наконец, относительно горизонтальной оси вдоль движения листа верхний диск наклонен на 2,5°, что способствует снижению усилия и уменьшению величины прикромочного утонения (утяжки).

Окружная скорость роликов рольгангов и дисков ножей составляла 0,4 м/с. Листу, в начальный момент времени, также была задана скорость движения 0,4 м/с.

В качестве примера на рис. 1 представлено напряженно-деформированное состояние листа по результатам моделирования для стали 65Г.

Опираясь на результаты проводившихся ранее исследований [4] для определения предельных нагрузок процесс моделирования был разделен на два этапа. Вначале в течение одной секунды моделируемого процесса лист перемещался в условиях свободного (без дополнительного внешнего сопротивления) движения до наступления установившегося состояния процесса. Затем на торцевую поверхность листа воздействовали нагрузкой Q_f , противоположной по направлению и линейно возрастающей во времени, до полного выталкивания листа из ножей, что в реальных условиях может соответствовать «бурению» листа или кромки в процессе резки.

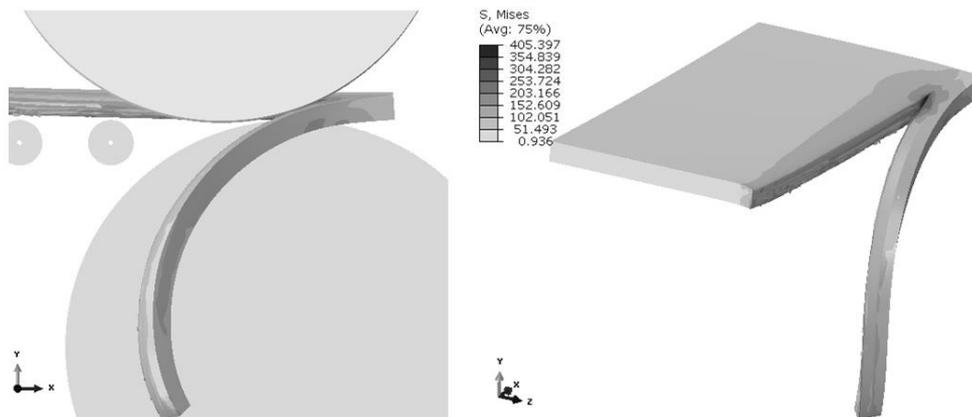


Рис. 1 – Напряженно-деформированное состояние листа по результатам моделирования на примере стали 65Г

Результаты исследований. По результатам моделирования были получены зависимости силовых и кинематических параметров, а именно моментов и сил на верхнем и нижнем ножах, а также линейной скорости листа.

Полученные зависимости были использованы при последующем анализе и разработке алгоритма расчета скорости движения листа.

Следует отметить, что при реализации процесса резки толстых листов дисковыми ножами момент на верхнем ноже всегда меньше момента на нижнем ноже [4], а их величина и соотношение существенно зависят, прежде всего, от силы внешнего сопротивления Q_f .

Это объясняется тем, что на контакте между верхним ножом и отрезаемой кромкой имеют место зоны опережения и отставания, размер которых зависит от силы внешнего сопротивления Q_f , что полностью подтверждается результатами моделирования (рис. 2) и экспериментальными данными [4].

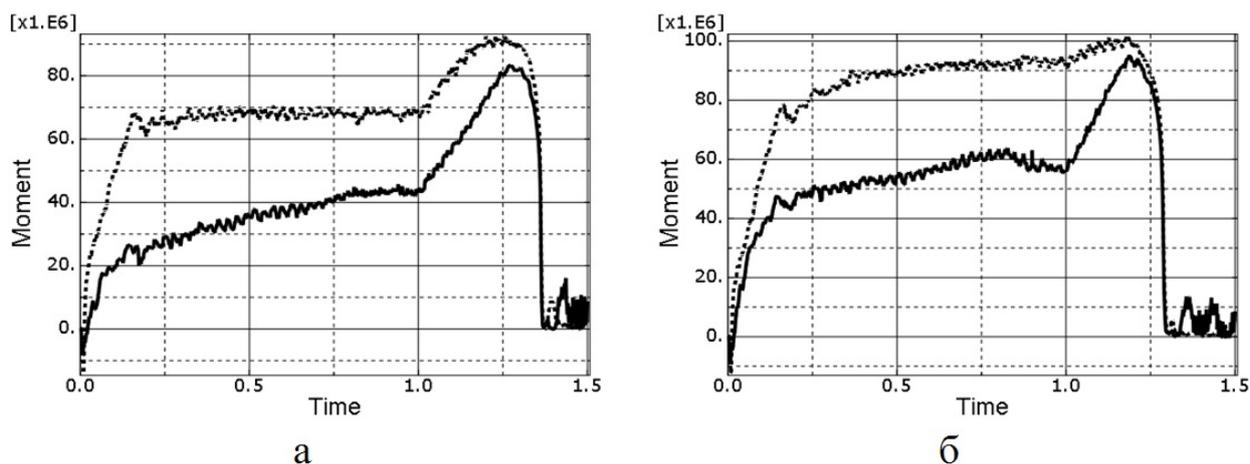


Рис. 2 – Зависимость момента резки (Нмм) на верхнем (—) и нижнем (---) ножах: а – для стали 20 и б – 65Г

В связи с этим, при расчете величин моментов на верхнем и нижнем ноже, следует использовать понятия приведенных значений коэффициентов трения (рис. 3), которые по результатам моделирования были получены как:

$$f_1 = \frac{M_1}{R \cdot N_1} \text{ и } f_2 = \frac{M_2}{R \cdot N_2}, \quad (1)$$

где M_1 и M_2 – соответственно крутящий момент на верхнем и нижнем ноже;

R – радиус диска ножа;

N_1 и N_2 – соответственно радиальные силы на верхнем и нижнем ноже.

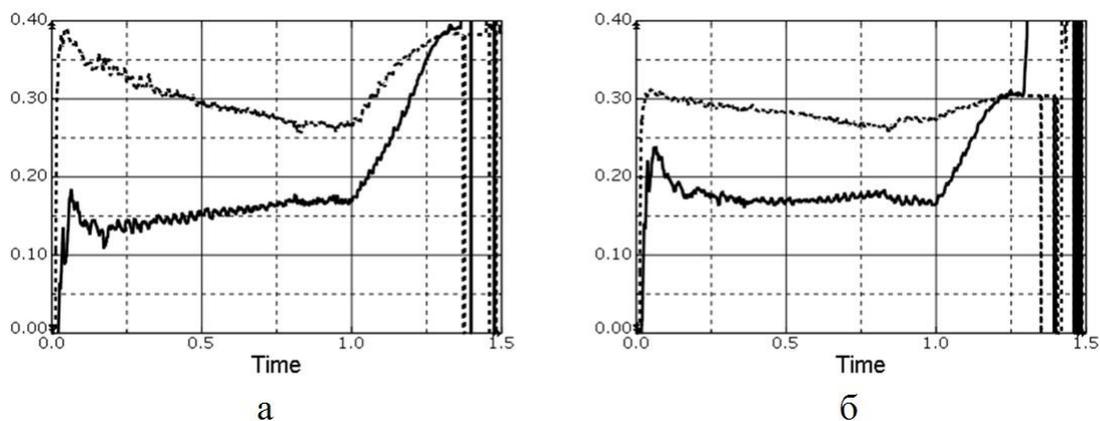


Рис. 3 – Зависимость приведенных значений коэффициентов трения на верхнем (—) и нижнем (---) ножах для стали: а – 20 и б – 65Г

Очевидно, что мощность, расходуемую на резку и движение (втягивание) листа парой ножей можно определить из следующего выражения:

$$W_{\Sigma} = (M_1 + M_2) \frac{V_o}{R}, \quad (2)$$

где V_o – окружная скорость ножа.

В то же время, рассматривая линейное движение листа в ножах суммарную мощность можно представить, как сумму:

$$W_{\Sigma} = W_a + W_s, \quad (3)$$

где W_a и W_s – соответственно мощность активных (втягивающих) сил и сил скольжения, спроецированных на горизонталь:

$$W_a = F_a V_l = (N_1 \cos(\gamma_1) f_1 + N_2 \cos(\gamma_2) f_2) V_l = (N_{1y} f_1 + N_{2y} f_2) V_l, \quad (4)$$

$$W_s = F_s V_l = N_2 \cos(\gamma_2) f_{ск} V_l = N_{2y} f_{ск} V_l, \quad (5)$$

где γ_1 и γ_2 – соответственно углы, определяющие направление радиальных сил на верхнем и нижнем ноже по отношению к вертикальной оси диска;

N_{1y} и N_{2y} – соответственно вертикальные компоненты радиальных сил на верхнем и нижнем ноже;

$f_{ск}$ – коэффициент скольжения:

$$f_{ск} = \frac{V_o - V_l}{V_l} f_2 (a + bf + cf^2), \quad (6)$$

где f – коэффициент трения, который для моделируемых условий составил: сталь 20 – 0,546; сталь 65Г и 75 – 0,42; сталь 15ХСНД – 0,3;

a, b, c – коэффициенты регрессии, которые по результатам моделирования, для указанного диапазона коэффициента трения, составили: $a = 2,76$; $b = -3,44$; $c = 4,69$.

Углы направления радиальных сил находят, как:

$$\gamma_1 = \arctg(N_{1x}/N_{1y}) \text{ и } \gamma_2 = \arctg(N_{2x}/N_{2y}), \quad (7)$$

где N_{1x} и N_{2x} – соответственно горизонтальные компоненты радиальных сил на верхнем и нижнем ноже.

При этом величина внешнего сопротивления определяется из условия равновесия:

$$Q_f = N_{2x} - N_{1x}. \quad (8)$$

Окончательно, приравняв (2) и (3) с использованием (4) и (5), после несложных преобразований получим уравнение для скорости движения листа:

$$V_l = \frac{N_1 f_1 + N_2 f_2 [1 - \cos(\gamma_2) (a + bf + cf^2)]}{N_1 f_1 \cos(\gamma_1) + N_2 f_2 \cos(\gamma_2) [1 - (a + bf + cf^2)]} V_o. \quad (9)$$

На рис. 4, в качестве сравнения, представлены зависимости скорости движения листа по результатам моделирования МКЭ и по уравнению (9) с использованием расчетных зависимостей, полученных при моделировании МКЭ. Разница между полученными результатами не превысила 3%.

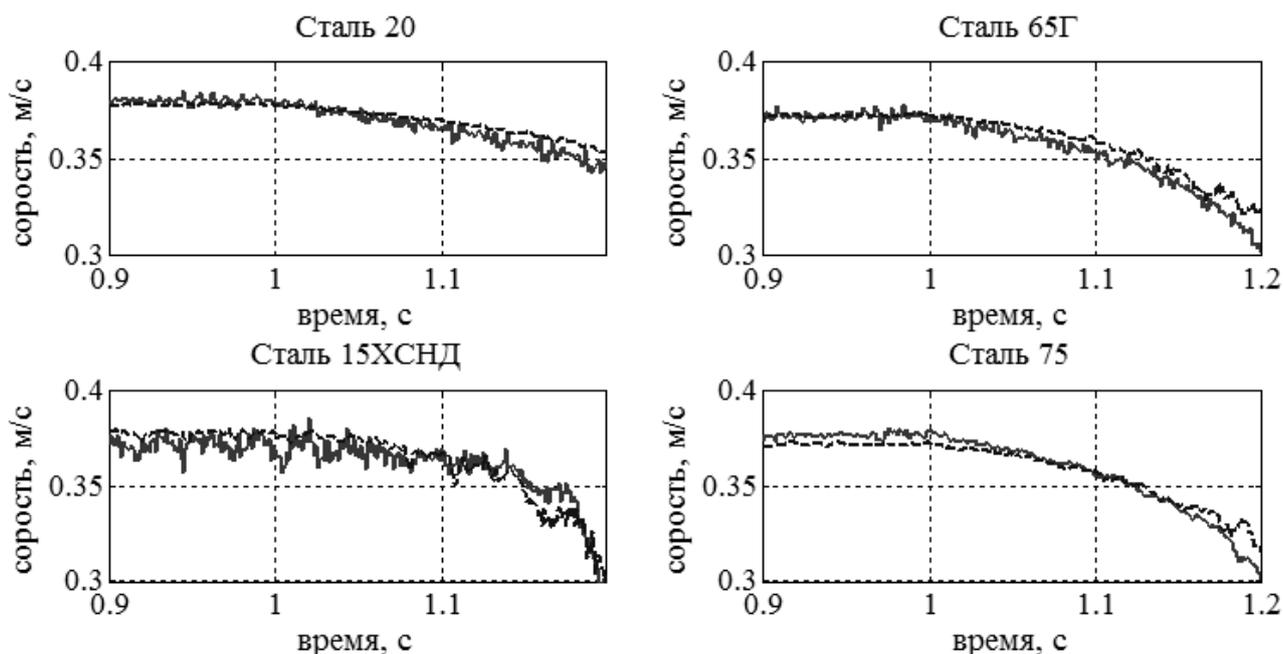


Рис. 4 – Зависимости скорости движения листа по результатам моделирования МКЭ(—) и по уравнению (9) (---) для различных условий реализации процесса

Таким образом, можно утверждать, что предложенный алгоритм расчета скорости движения листа при резке дисковыми ножами может быть использован при инженерных и проектно-конструкторских расчетах процесса резки толстых листов дисковыми ножами.

Выводы. Полученные результаты подтверждают, что скорость резки листов дисковыми ножами ниже окружной скорости ножей и существенно зависит от сил внешнего сопротивления. При этом величина коэффициента трения мало влияет на установившуюся скорость листа, при отсутствии сил внешнего сопротивления, которая в моделируемых условиях составила $(0,91...0,95)V_0$, однако при наличии сил внешнего сопротивления с уменьшением коэффициента трения скорость листа снижается более интенсивно.

Список литературы: 1. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Справочное пособие в 2-х т. / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – Книга 1: Производство горячекатаных листов и полос. – 2008. – 640 с. 2. Ginzburg V. B. Flat-rolled steel processes: Advanced Technologies / V. B. Ginzburg. – CRC Press, 2009. – 372 p. 3. Лукашин Н. Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 с. 4. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах : дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук, спец. 05.03.05 / Боровик П. В. – Краматорск, 2008. – 225 с. 5. Пат. 25865 Україна, МПК В23D19/00. Ножиці дискові з подавальними роликками / Гриценко С. А., Калашиников А. А., Багнов В. П. та ін.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №200703913; заявл. 10.04.07; опубл. 27.08.08, Бюл. №13. 6. Пат. 63571 Україна, МПК В23D19/00. Дискові ножиці / Боровик П. В., Селезньов М. Є.; заявник і патентовласник Донбаський гірничо-металургійний інститут. – №201103732; заявл. 28.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл.

№19. 7. Пат. 72820 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стану / *Боровік П. В., Селезньов М. Є.*; заявник і патентовласник Донбаський гірничо-металургійний інститут. – №201202702; заявл. 06.03.12; опубл. 27.08.12, Бюл. №16. 8. *Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek.* – 2003. – 348 с. 9. *Боровік П. В.* Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / *П. В. Боровік // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, – 2013. – №1(14). – С. 69–76.*

Bibliography (transliterated): 1. *Konovalov Ju. V. Spravochnik prokatchika. Spravochnoe posobie v 2-h t. Ju. V. Konovalov.* – Moscow. : Teplotehnik, 2008. – Kniga 1: Proizvodstvo gorjachekatannyh listov i polos. – 2008. – 640 P. 2. *Ginzburg V. B. Flat-rolled steel processes: Advanced Technologies V. B. Ginzburg.* – CRC Press, 2009. – 372 p. 3. *Lukashin N. D. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov N. D. Lukashin, L. S. Kohan, A. M. Jakushev* – Moscow: ІКС «Akademkniga», 2003. – 456 P. 4. *Borovik P. V. Sovershenstvovanie tehnologii i oborudovanija processa prodol'noj rezki tolstyh gorjachekatannyh listov na diskovyh nozhnicah : diP. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk, spec. 05.03.05 Borovik Pavel Vladimirovich.* – Kramatorsk, 2008. – 225 P. 5. Пат. 25865 Україна, МПК В23D1900. Nozhyci diskovi z podaval'nymy rolykami *Grycenko S. A., Kalashnikov A. A., Bagnov V. P. ta in.*; заявник і патентовласник ЗАТ «Novokramators'kyj mashynobudivnyj zavod». – №200703913; заявл. 10.04.07; опубл. 27.08.08, Вжл. №13. 6. Пат. 63571 Україна, МПК В23D1900. Diskovi nozhyci *Borovik P. V., Selez'ov M. Je.*; заявник і патентовласник Donbas'kyj girnycho-metalurgijnyj instytut. – №201103732; заявл. 28.03.11; опубл. 10.10.11, Вжл. №19. 7. Пат. 72820 Україна, МПК В23D1900. Sposib roztashuvannja diskovyh nozhyc' v potoci prokatnogo stanu *Borovik P. V., Selez'ov M. Je.*; заявник і патентовласник Donbas'kyj girnycho-metalurgijnyj instytut. – №201202702; заявл. 06.03.12; опубл. 27.08.12, Вжл. №16. 8. *Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course G. R. Liu, P. P. Quek.* – 2003. – 348 P. 9. *Borovik P. V. Matematicheskoe modelirovanie processa rezki tolstolistovyh raskatov v gorjachem sostojanii na diskovyh nozhnicah P. V. Borovik Resursozberigajuchi tehnologii' vyrobnictva ta obrobyky tyskom materialiv u mashynobuduvanni: Zb. nauk. pr. – Lugansk: Vyd-vo SNU im. V. Dalja, – 2013, – №1(14). – P. 69–76.*

Поступила (received) 25.10.2014

УДК 621.923

Т. М. БРИЖАН, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь;
С. А. ДИТИНЕНКО, канд. техн. наук, ХНЭУ, Харьков

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

В работе предложена математическая модель определения составляющих силы резания при развертывании отверстий с позиции косоугольного резания, что позволило обеспечить высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных. Теоретически и экспериментально обоснована возможность существенного снижения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания за счет создания наклонных зубьев на развертке, что способствует повышению точности обработки отверстий. Показано значительное влияние интенсивности трения на передней поверхности зуба развертки на силы резания при развертывании отверстия.

Ключевые слова: развертывание отверстий, зубья развертки, механическая обработка, точность обработки, сила резания, коэффициент усадки стружки.