

3. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали / И. А. Панковец [и др.] // *Черная металлургия : бюл. науч.-техн. и эконом. информ.* – 2021. – Т. 77, № 7. – С. 804–810. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-7-804-810>
4. Савченко, С. А. Совершенствование технологического процесса горячей прокатки шарикоподшипниковых сталей в условиях стана 370/150 ОАО «БМЗ» УКХ «БМК» / С. А. Савченко // *Беларусь в современном мире : материалы XII Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 16–17 мая 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание» ; под общ. ред. В. В. Кириенко.* – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 282–285.

УДК 621.965.01

**ЭНЕРГОСИЛОВОЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫМ  
МОДЕЛИРОВАНИЕМ РЕЗА АРМАТУРЫ № 16  
ПРИ ТРЕХНИТОЧНОЙ ПРОКАТКЕ**

**В. М. Полетаев**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель И. В. Астапенко

*Проведены исследования численным моделированием по методу конечных элементов основных параметров реза арматурного профиля № 16 для условий трехниточной горячей прокатки на стане 320. Определены динамика усилия реза и глубина вмятия, позволяющие сформулировать точную математическую зависимость для расчета энергосиловых параметров.*

**Ключевые слова:** горячая прокатка, численное моделирование, метод конечных элементов, усилие реза, арматурный профиль.

**ENERGY-FORCE ANALYSIS BY NUMERICAL MODELING  
OF CUTTING REINFORCEMENT № 16 DURING  
THREE-THREAD ROLLING**

**V. M. Poletaev**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Science supervisor I. V. Astapenko

*Numerical modeling studies using the finite element method were carried out on the main cutting parameters of reinforcing profile № 16 for the conditions of three-thread hot rolling on the 320 mill. The dynamics of the cutting force and the indentation depth were determined, which made it possible to formulate an exact mathematical relationship for calculating energy-power parameters.*

**Keywords:** hot rolling, numerical modeling, finite element method, cutting force, reinforcement profile.

Цель работы – разработать методику расчета резки арматуры № 16 класса А500 при трехниточной прокатке для условий делительных ножниц холодильника стана 320.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

– проведение аналитического определения параметров резки арматуры № 16 по принятой эмпирической методике;

- построение адекватных численных моделей процесса на основе математических зависимостей реальной упругой и пластической деформации металлов;
- сравнительный анализ и определение зависимостей для уточнения расчетных методик.

В условиях стана 320 ОАО «Белорусский металлургический завод» – управляющая компания холдинга «Белорусская металлургическая компания» прокатка арматурных профилей № 8–20 осуществляется по «слиттинг-процессу» в несколько (2–5) линий получения готового проката. Полученный раскат круглого профиля (46 мм) далее обжимается в промежуточной группе на гладких бочках до требуемой ширины и высоты полосы в зависимости от применяемой схемы «слиттинг-процесса». За последним обжатием в калибре «гладкая бочка» выполняется кантовка раската перед контрольным калибром в клетки № 13. Для этого за клетью № 12 и № 13 установлены неприводные роликовые кантующие устройства для упругопластического поворота полосы на угол 90°. Далее прокатка проходит в специальных калибрах (клетки № 14, 16, 18), где формируется перемычка. После выхода из клетки № 18 происходит разрыв перемычки в неприводном делительном устройстве. В чистовых калибрах (клетки № 18, 20) окончательно формируется арматурный профиль № 16. Затем прокат проходит 2-секционную трассу термоупрочнения и поступает на участок холодильника, перед которым установлены кривошипные делительные ножницы, режущие прокат на мерные длины по ширине холодильника [1, 2].

В классическом представлении процесса резки на ножницах выделяют три стадии (рис. 1): вмятие ножей в металл; сдвиг (рез); отрыв (образование заусенца). Основная проблема аналитического расчета по общепринятым методикам максимального усилия реза при прокатке по «слиттинг-процессу» – использование метода приведенной полосы суммарной площади одного сплошного квадратного сечения [3].

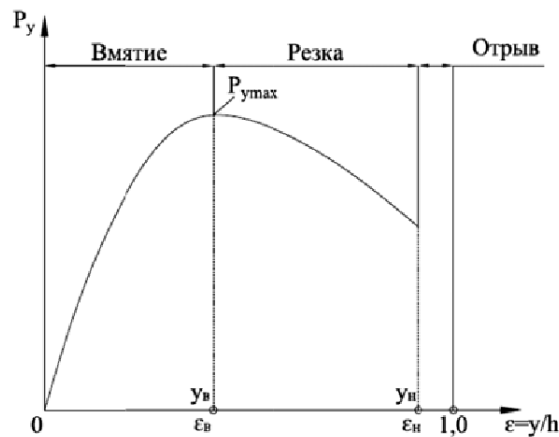


Рис. 1. Изменение усилия реза

Для аналитического расчета усилия резания ( $P_{рез}$ ) по методу приведенной полосы использовали формулу для ножниц с прямыми ножами [4]:

$$P_{рез} = k_1 k_2 k_3 s_B (1 - \varepsilon_B) F_{сеч},$$

где  $k_1$  – коэффициент, равный отношению максимального сопротивления срезу к пределу прочности ( $t_{max}/s_B$ )  $\gg 0,65-0,75$ , принимаем  $k_1 = 0,75$ ;  $k_2$  – коэффициент,

### 384 Перспективные направления совершенствования материалов и технологий

учитывающий повышение усилия при притуплении ножей,  $k_2 = 1,1 \div 1,15$ , принимаем  $k_2 = 1,15$ ;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий влияние увеличения зазора между ножами при резании,  $k_3 = 1,1 \div 1,25$ , принимаем  $k_3 = 1,25$ ;  $s_B$  – предел прочности арматуры, Н/мм<sup>2</sup>. Для класса А800  $s_B = 1000$ – $1200$  Н/мм<sup>2</sup>.

Так как отсутствуют данные по пределу прочности при температуре резания ( $T_{c/o} = 400$ – $460$  °С), принимаем  $s_B = 1000$  Н/мм<sup>2</sup>,  $s_B = 1200$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\varepsilon_B$  – коэффициент вмятия,  $\varepsilon_B = 0,2$  (холодное резание, сталь 20),  $\varepsilon_B = 0,30 \div 0,35$  (горячее резание, сталь 20), принимаем среднее  $\varepsilon_B = 0,25$ ;  $F_{сеч}$  – номинальная приведенная площадь поперечного сечения трех стержней.

Номинальная площадь поперечного сечения тройки стержней, подаваемой под ножи, согласно таблице калибровки для арматуры № 16 × 3:  $F_{сеч} = 204 \cdot 3 = 612$  мм<sup>2</sup>.

Расчетное усилие резания составит:

– при  $s_B = 1000$  Н/мм<sup>2</sup>

$$P_{рез} = 0,75 \cdot 1,15 \cdot 1,25 \cdot 1000(1 - 0,25)612 = 564,577 \text{ кН (94 \% от макс.)} < 600 \text{ кН};$$

– при  $s_B = 1200$  Н/мм<sup>2</sup>

$$P_{рез} = 0,75 \cdot 1,15 \cdot 1,25 \cdot 1200(1 - 0,25)612 = 677,492 \text{ кН (113 \% от макс.)} > 600 \text{ кН},$$

где 600 кН – максимальное усилие резания делительных ножниц.

Согласно результатам расчета, использование делительных ножниц холодильника с максимальным усилием резания 600 кН при прокатке в три нитки арматуры № 16 класса 800 может привести к их поломке. Однако по данным телеметрии стана по нагрузке на привод ножниц крутящий момент используется только на 60 %.

Опираясь на результаты работы [5], в которой на базе разработанной математической модели энергосиловых параметров процесса поперечной резки на мерные длины, можно сделать вывод, что распределение усилия реза в зависимости от хода ножей и температурно-деформационных параметров имеет сложный характер, и степень уточнения результатов, полученных по методикам традиционных расчетов, может достигать 50 %.

На втором этапе исследования была построена численная модель в программном пакете Qform и выполнен расчет по методу конечных элементов по определению усилия реза для полос трех линий № 16 (рис. 2).

Полученные значения по усилию реза соответствуют симметричной нагрузке ножей. Полное усилие соответствует удвоенному значению.

Анализ результатов моделирования показал, что при резе сплошного сечения время и работа реза почти в два раза больше.

Величина глубины вмятия  $\varepsilon_B = 0,41$ – $0,45$ , что существенно больше теоретических значений ( $\varepsilon_B = 0,2$ – $0,35$ ).

После обработки результатов численного моделирования в программном пакете математической статистики были проведена линия тренда изменения усилия реза, рассчитано ее уравнение и определена степень достоверности расчета ( $R^2 = 0,9851$ ).

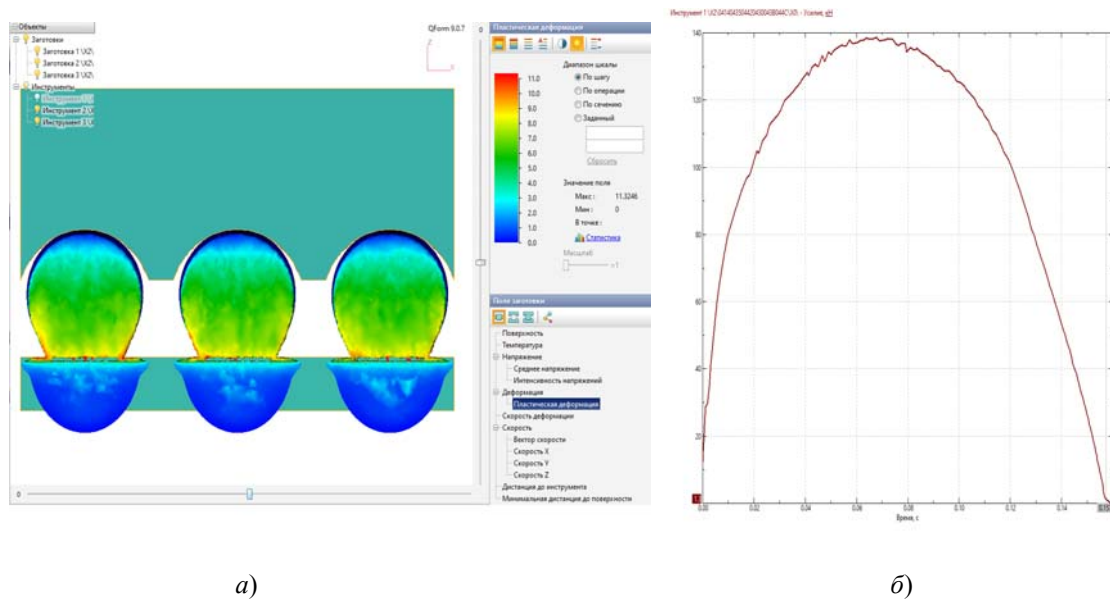


Рис. 2. Результаты численного эксперимента:  
 а – диаграмма сдвиговых деформаций; б – график изменения  
 усилия реза в зависимости от глубины внедрения ножей

Для определения усилия реза полосы в три линии ( $P_{рез}$ ) для ножниц с прямыми ножами в соответствии с действующими технологическими параметрами процесса, кН:

$$P_{рез} = 2 \times [-38004\epsilon_v^2 + 5446,2\epsilon_v + 89,308],$$

где  $\epsilon_v = 0,41$  – глубина вмятия для прокатки арматуры № 16 × 3 класса А800.

Результаты исследования:

- изучены условия и параметры работы делительных ножниц на стане 320;
- разработана численная модель процесса резки в делительных ножницах J W-KSR 1540 стана 320 по действующей технологии для трехниточной резки;
- выполнен аналитический расчет по типовой методике усилия реза для арматуры № 16 × 3 класса А800;
- определена математическая зависимость для определения усилия резки, установлены коэффициенты глубины вмятия  $\epsilon_v$ .

#### Л и т е р а т у р а

1. Барановский, Д. С. Конструктивные решения контроля ширины полосы для горячей прокатки по «слиттинг-процессу» / Д. С. Барановский // Беларусь в современном мире : материалы XIV Междунар. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 13–14 мая 2021 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Гомел. обл. орг. о-ва «Знание»; под общ. ред. В. В. Кириенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – С. 250–253.
2. Барановский, Д. С. Совершенствование прокатки по «слиттинг-процессу» в контрольном калибре стана 320 ОАО «БМЗ» / Д. С. Барановский // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2021. – Ч. 1. – С. 93–97.
3. Астапенко, И. В. Оборудование прокатных цехов : практикум / И. В. Астапенко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2015. – 47 с.

4. Королев, А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов / А. А. Королев. – М. : Металлургия, 1985. – 375 с.
5. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка : справ. : в 6 т / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под. ред. Б. М. Илюковича. – Днепропетровск : ДніпроВАЛ, 2002. – Т. 1. Основы теории калибровки. Калибровка блюмов и заготовки, кругов и шестигранников, квадратной стали, проволоки и арматуры. – 506 с.

УДК 550.34.013.4

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРВИСНОГО РОБОТА**

**Ю. А. Кондратенко, В. А. Пракопович**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель М. И. Михайлов

*Представлено проведение математического анализа движения и решение уравнения кинематики сервисного робота. Уравнение кинематики дает возможность с помощью данных, получаемых от датчиков робота, предсказать его положение во время движения.*

**Ключевые слова:** сервисный робот, уравнение кинематики, анализ, датчик, траектория.

## **SERVICE ROBOT SIMULATION**

**Yu. A. Kondratenko, V. A. Prakopovich**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Science supervisor M. I. Mikhailov

*The mathematical analysis of motion and the solution of the service robot kinematics equation are presented. The kinematics equation makes it possible, using the data received from the robot's sensors, to predict its position during movement.*

**Keywords:** service robot, kinematics equation, analysis, sensor, trajectory.

Целью исследований является повышение мобильности сервисного робота. Разработана 3D-модель сервисного робота, которая представлена на рис. 1.

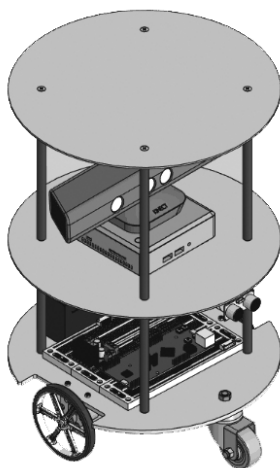


Рис. 1. 3D-модель робота