

УДК 621.965.01

к.т.н. Боровик П. В.

(ДГМА, г. Краматорск, Украина, borovikpv@mail.ru)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ НА НОЖНИЦАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ НОЖАМИ

На базе известных зависимостей предложен метод получения кривых текучести материала при моделировании методом конечных элементов процесса разделения металла на ножницах в холодном состоянии. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Обоснована необходимость использования коэффициента перехода для пересчета напряжений текучести при переходе от условий растяжения к срезу. Определены расчетные значения коэффициента перехода для рассмотренных материалов и предложена регрессионная модель по его расчету. Предложены зависимости степени и скорости пластической деформации по перерезаемому сечению от относительной глубины внедрения ножей в металл.

Ключевые слова: кривая текучести, ножницы, коэффициент перехода, деформация, скорость деформации.

В настоящее время, в условиях современного прокатного производства широко используются ножницы продольной и поперечной резки проката [1], которые являются весьма сложными машинами по кинематике и конструкции. При этом актуальными задачами являются расширение технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования, повышение точности производимых конструкторских расчетов и увеличение степени научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

Следует отметить, что экспериментальные исследования процессов обработки давлением не всегда способны обеспечить полноту информации, либо это требует целого ряда дополнительных финансовых затрат и организационных действий. Благодаря росту возможностей вычислительной техники, успешно развиваются подходы теоретических исследований, базирующиеся на разработке численных математических моделей. В основу данных моделей положены методы теории упругости и пластичности, а также вопросы механики разрушения, что, при достоверной информации о механических свойствах конкретного материала, позволяет в максимально полной степени отображать реаль-

ные физические процессы, протекающие в металле.

Особое место в решении таких задач [2–4] занимает метод конечных элементов (МКЭ). Однако максимально полная степень отображения реального процесса в ходе моделирования МКЭ возможна только при наличии достоверных кривых текучести и диаграмм пластичности [5] в исследуемых диапазонах температур, степени и скорости деформации, учитывающие специфику процесса.

Целью данной работы является расширение представления о протекании процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами и поиск возможностей дальнейшего совершенствования методов расчета.

Практически для любой марки стали в справочной литературе, можно найти результаты испытаний на растяжение, характеризующиеся пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и пределом прочности σ_b материала при растяжении, а также относительным удлинением δ , которые учитывают способ производства и термическую обработку металла.

Кроме того известно, что процессы обработки давлением сопровождаются тер-

динамическими эффектами, однако, в условиях холодной деформации, поведение материалов может быть диаметрально противоположным и способствовать, как увеличению, так и уменьшению сопротивления деформации. Учитывая, что нагрев металла имеет место в небольших локальных объемах, то влиянием термодинамических эффектов было решено пренебречь.

При построении кривых текучести учет влияния скорости деформации производился по известной зависимости [6]:

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v, \quad (1)$$

где σ_{cm} — сопротивление деформации при статических испытаниях; K_v — скоростной коэффициент.

Сопротивление деформации при статических испытаниях определялось из уравнения, предложенного в работе [7]:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{0,2} (\bar{\varepsilon}_p / 0,002)^{m_0}, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ — степень истинной пластической деформации; m_0 — показатель упрочнения, который зависит от соотношения предела прочности к пределу текучести $\sigma_b / \sigma_{0,2}$.

Для определения показателя упрочнения, по данным работы [7], была получена следующая аппроксимация:

$$m_0 = 0,008 + 0,2515 \ln(\sigma_b / \sigma_{0,2})^{0,818}. \quad (3)$$

Скоростной коэффициент, определялся из выражения [6]:

$$K_v = (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{cm})^{m_1}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — текущая скорость деформации; $\dot{\varepsilon}_{cm}$ — скорость деформации при статических испытаниях; m_1 — степенной показатель, определяемый механическими свойствами материала [6].

Затем, используя МКЭ, осуществлялось моделирование процесса холодной резки параллельными ножами на базе программного комплекса Abaqus. Математическая

модель описывала плоскую задачу резки параллельными ножами с учетом жесткости станины [8].

В качестве исходных данных для моделирования были взяты результаты экспериментальных исследований процесса холодной резки параллельными ножами приведенные в работе [1].

Кроме того, были использованы результаты лабораторных экспериментальных исследований при резке алюминиевого сплава АА6066, которые проводились в условиях кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск) на лабораторной установке кривошипно-шатунных ножниц с параллельными ножами.

В таблице 1 приведены, названия материалов, их механические свойства и условия процесса резки параллельными ножами. По результатам моделирования МКЭ были получены соответствующие зависимости силы резки, которые во всех рассмотренных случаях имели завышенный результат в диапазоне порядка 15...43% по отношению к экспериментальным данным.

Такое явление, вполне объяснимо, поскольку в классических методиках расчета максимальной силы резки [1] используют коэффициент перехода от предела прочности при растяжении к пределу прочности при срезе. Величина этого коэффициента зависит от разрезаемого металла и по данным различных исследователей, для разных материалов, может колебаться в пределах $K_\sigma = 0,6...0,9$.

В соответствии с этим, на следующем этапе исследования, путем соотношения результатов моделирования и экспериментальных данных были получены расчетные значения коэффициентов перехода K_σ , при которых максимальные значения силы резки соответствовали экспериментальным данным. Величины коэффициентов перехода K_σ для каждого из экспериментальных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 1 — Характеристика экспериментальных образцов и условий реализации эксперимента

№	Марка материала*	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	m_1	Сторона квадрата, мм	Скорость ножа, мм/с
1	АА6066	360	395	18	0,020	10	30
2	Сталь 20	418	527	21,7	0,019	25	300
3	Сталь 45 (канатная сталь)	347	660	19,7	0,019	25	300
4	ШХ10	439	822	16,6	0,019	25	300
5	Сталь 75 (пружинная сталь)	574	989	10,8	0,019	25	300
6	Сталь 15 (1015)	177	373	32	0,019	25	300
7	Сталь 18Х2Н4ВА (Э16)	910	1128	9	0,019	25	300
8	Сталь 12Х18Н9 (ЭЯ1)	230	589	45	0,019	25	300

* — в скобках указаны названия в соответствии с данными А.И. Целикова

Таблица 2 — Расчетные значения коэффициента перехода K_σ

АА6066	Сталь 20	Сталь 45 (канатная сталь)	ШХ10	Сталь 75 (пружинная сталь)	Сталь 15 (1015)	Сталь 18Х2Н4ВА (Э16)	Сталь 12Х18Н9 (ЭЯ1)
0.87096	0.8265	0.8075	0.6982	0.76	0.779	0.84	0.87

В качестве сравнения полученных результатов, на рисунке 1 показаны кривые удельного сопротивления срезу для 5 марок стали. При этом на оси абсцисс показано относительное смещение ножа, вместо традиционного относительного внедрения ножей в металл. Это обусловлено тем, что при проведении экспериментальных исследований в работе [1] не учитывалась упругая деформация станины ножниц, которая, как было показано в работе [8], несколько видоизменяет зависимость удельного сопротивления срезу от относительного внедрения ножей в металл.

При оценке влияния механических свойств материала при растяжении на коэффициент перехода K_σ , в ходе регрессионного анализа были определены коэффициенты корреляции коэффициента перехода с каждым отдельно взятым параметром. Однако гипотеза о линейной зависимости между коэффициентом перехода и каким-либо из рассмотренных параметров не подтвердилась.

В связи с этим была предпринята попытка перебора параметров с применением итерационных процедур и метода наименьших квадратов, с целью получения максимального значения коэффициента корреляции. В результате был получен показатель механических свойств материала:

$$X_\sigma = \left[\varepsilon_n^{\sqrt{2}} m_0^2 \frac{\sqrt{3}}{\ln(1+\delta)} \left(\frac{\ln\left(\frac{3}{2} + \delta^3\right)}{\ln(1+\delta)} \right)^{m_0+1} - 1 \right]^{\frac{1}{10}}. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции, в данном случае, составил $R = -0,9763$.

Уравнение регрессии коэффициента перехода, при этом определяется выражением:

$$K_\sigma = \ln(8) - \sqrt{3} X_\sigma. \quad (6)$$

Погрешность между значениями коэффициента перехода K_σ , представленными в таблице 1 и полученными из уравнения (6) составила не более $\pm 3\%$.

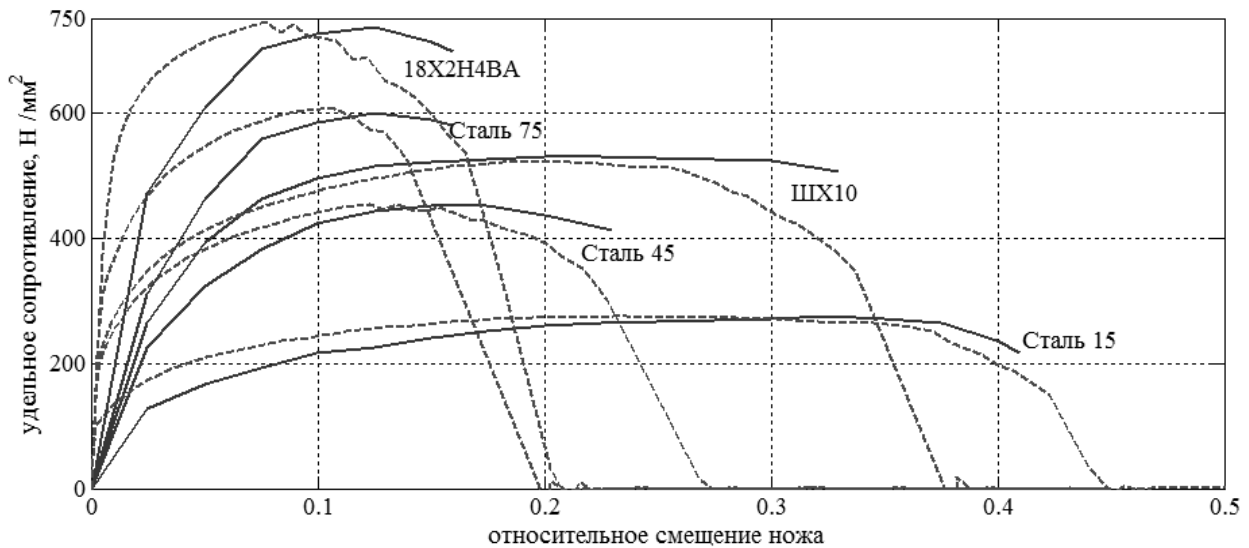


Рисунок 1 — Кривые удельного сопротивления срезу по данным работы [1] (—) и по результатам моделирования МКЭ при использовании коэффициента перехода представленного в таблице 2 (---)

Окончательно, при моделировании МКЭ процесса разделения металла на ножницах, целесообразно ввести в уравнение (1) коэффициент перехода K_{σ} :

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v K_{\sigma}, \quad (7)$$

При дальнейшем анализе процесса резки устанавливалась связь между относительной глубиной внедрения ножей в металл ε (отношение величины внедрения к разрезаемой толщине) и величиной пластической деформации.

Поскольку величина пластической деформации в ходе процесса резки представляет собой интегральный показатель, вначале были определены элементы, которые претерпевают разрушение и величины пластической деформации для соответствующих им элементарных объемов. Затем были получены усредненные значения пластической деформации для всех разрушаемых элементов.

При этом установлено, что степень пластической деформации по перерезаемому сечению зависит от относительной глубины внедрения и описывается следующей зависимостью:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{\max} \frac{e^{\frac{5}{2}\varepsilon_n} - 1}{\frac{5}{2} - 1} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где $\bar{\varepsilon}_{\max}$ — максимальная степень пластической деформации в очаге резки, при полном разделении; ε_n — относительное внедрение до скола.

Для определения скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в ходе процесса резки с известной скоростью движения ножа следует относительное внедрение ножей в металл представить в виде:

$$\varepsilon = \frac{vt}{h}, \quad (9)$$

где v — скорость движения ножа; t — время движения ножа; h — толщина разрезаемого листа.

Подставив (9) в (8) и продифференцировав по времени скорость, после преобразования, скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ можно представить как функцию относительного внедрения ножей в металл:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max}^{\nu}}{h \varepsilon_n \left(e^{\frac{5}{2}} - 1 \right)} \left[\frac{5}{2} e^{\frac{5}{2} \varepsilon_n} \times \right. \\ \left. \times \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \left(e^{\frac{5}{2} \varepsilon_n} - 1 \right) \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (10)$$

На рисунке 2 показаны кривые напряжение-деформация, полученные МКЭ и на базе алгоритма (2)–(10).

Как можно видеть из представленных зависимостей кривые напряжение-деформация имеют достаточно высокую сходимость при интенсивности деформаций в зависимости от марки материала $\bar{\varepsilon}_i \leq 0,2 \dots 0,4$, что указывает на адекватность полученного алгоритма. Увеличение расхождения между данными зависимостями при росте интенсивности деформаций можно объяснить тем, что по мере роста деформации в материале заготовки постепенно накапливаются повреждения, что влияет на поведение материала. Таким образом, существует необходимость проведения дополнительных теоретических и

экспериментальных исследований в данном направлении с целью выявления ряда закономерностей, позволяющих расширить представление о поведении материала и собственно процессе.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- на базе известных зависимостей разработан метод построения кривых текучести материала при моделировании МКЭ процесса холодного разделения на ножницах с параллельными ножами;

- показано, что использование данного метода позволяет получать результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными;

- получены зависимости степени и скорости пластической деформации по перерезаемому сечению от относительной глубины внедрения ножей в металл;

- предложенный алгоритм может явиться основанием для дальнейшего совершенствования методов расчета энергосиловых параметров и основных показателей качества при разделении на ножницах в холодном состоянии.

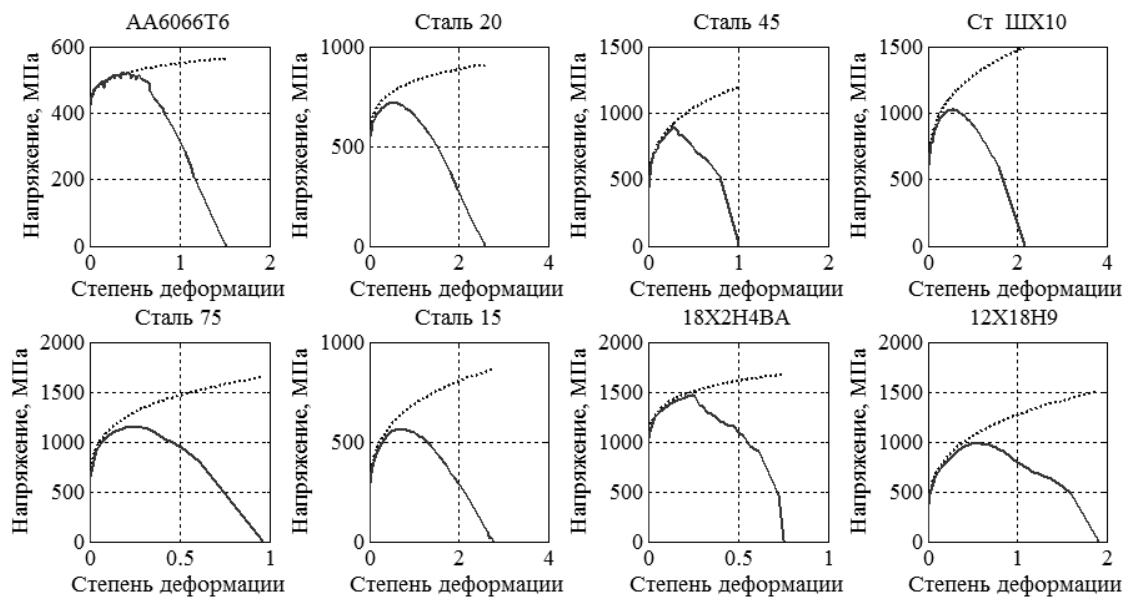


Рисунок 2 — Кривые напряжение-деформация, полученные при обработке результатов моделирования МКЭ (—) и на базе разработанного алгоритма (---)

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях разделительных операций металлопроката профилей на ножницах в холодном состоянии. В перспективе это позволит по

результатам моделирования разрабатывать рекомендации направленные на совершенствование существующих и разработку новых проектно-конструкторских и технологических решений.

Библіографічний список

1. *Машиностроение: энциклопедия* / [ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др.]. — М.: Машиностроение, 2000. — Т. IV—5: *Машины и агрегаты металлургического производства* / [Н. В. Пасечник, В. М. Синицкий, В. Г. Дрозд и др.]; под. ред. В. М. Синицкого, Н. В. Пасечника. — 2000. — 912 с.
2. Боровик П. В. *Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах* / П. В. Боровик // *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.
3. *3D numerical simulation of anisotropic thin sheet metal slitting process using fully coupled constitutive equations including ductile damage* / K. Saanouni, N. Belamri, P. Autesserre // *International Journal of Material Forming*, August 2009. — Volume 2, Issue 1 Supplement. — P. 535–538.
4. *Numerical simulation of the fine blanking process of sheet titanium* / J. Adamus, P. Lacki, W. Wieckowsky // *Archives of metallurgy and materials*, 2011. — Volume 56, Issue 2. — P. 431–437.
5. Огородников В. А. *Оценка деформируемости металлов при обработке давлением* / В. А. Огородников. — К.: Вища шк., 1983. — 175 с.
6. Ушаков М. В. *Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов* / М. В. Ушаков, С. Ю. Ильохин, И. А. Воробев // *Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. — Ч. 2.* — Тула: ТулГУ, 2010. — С. 89–93.
7. *Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении: справочник* / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов [и др.]. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 408 с.
8. Боровик П. В. *Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины* / П. В. Боровик // *Вестник национального технического университета ХПИ.* — Харьков, 2011. — Вып. 47. — С. 76–80.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В. Н., д.т.н., проф. ВНУ им. Даля Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 05.06.14.

к.т.н. Боровік П. В. (ДДМА, м. Краматорськ, Україна, borovikpv@mail.ru)

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ МЕТАЛУ В ХОЛОДНОМУ СТАНІ НА НОЖИЦЯХ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ НОЖАМИ

На базі відомих залежностей запропоновано метод отримання кривих текучості матеріалу при моделюванні методом скінчених елементів про-процесу розділення металу на ножницях в холодному стані. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Обґрунтовано необхідність використання коефіцієнта переходу для перерахунку напружень текучості при переході від умов розтягування до зрізу. Визначено розрахункові значення коефіцієнта переходу для розглянутих матеріалів і запропонована регресійна модель його розрахунку. Запропоновано залежності ступеня і швидкості пластичної деформації по перетину, що перерізається, від відносної глибини проникнення ножів в метал.

Ключові слова: крива текучості, ножиці, коефіцієнт переходу, деформація, швидкість деформації.

Borovik P.V., Candidate of Engineering Sciences (DSMA, Kramatorsk, Ukraine, borovikpv@mail.ru)

**METAL SEPARATION IN COLD CONDITION ON SHEARS WITH PARALLEL BLADES
PROCESS ANALYSIS**

Method of obtaining material stress-strain curves in simulation with the help of finite elements of metal separation process on shears in cold condition was suggested on the basis of known dependences. The comparison of simulation results with experimental data was done. The necessity of usage of conversion index for recalculation of tensile stress-strain from tensile state to shear was grounded. Calculations of conversion index for materials observed are defined, and regression model on its calculation is suggested. Dependences of plastic strain and strain rate on separate section from relative depth of blades in metal were offered.

Key words: *stress-strain curve, shears, conversion index, strain, strain rate.*