

Боровик П.В.

к.т.н., доц., докторант, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина, e-mail: borovikpv@mail.ru

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ТЕКУЧЕСТИ
МАТЕРИАЛА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА
ХОЛОДНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ НА НОЖНИЦАХ**

Borovik P.V.

PhD, associate professor, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Donetsk region, Ukraine, e-mail: borovikpv@mail.ru

**THE BUILDING TECHNIQUE OF STRESS-STRAIN CURVES
OF MATERIAL DURING SIMULATION OF COLD SEPARATION
PROCESS BY SHEARS**

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 на примере семи марок стали и одного алюминиевого сплава. 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.

***Ключевые слова:** кривая текучести, ножницы, холодная резка, коэффициент перехода.*

Введение

В условиях современного прокатного производства широко используются ножницы продольной и поперечной резки проката [1-3], которые являются весьма сложными машинами по кинематике и конструкции. Актуальные задачи [4,5] по расширению технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования направлены на повышение точности производимых конструкторских расчетов и увеличение степени научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

Это возможно только при условии расширения представления о процессах, происходящих в металле, что позволяет сделать метод конечных элементов (МКЭ), который широко используется при моделировании различных технологических схем разделения металла [5-7].

Для эффективного применения МКЭ требуются кривые текучести и диаграммы пластичности [8] в исследуемых диапазонах температур, степени и скорости деформации, учитывающие специфику процесса.

Цель

Целью работы является разработка метода построения кривых текучести материала при моделировании процесса холодного разделения на ножницах с параллельными ножами.

Методика исследования

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 термодинамическими 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 [9]:

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

где σ_{cm} – сопротивление деформации при статических испытаниях;

K_v – скоростной коэффициент.

Сопротивление деформации при статических испытаниях определялось из уравнения, предложенного в работе [10]:

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

где $\bar{\epsilon}_p$ – 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 [10], 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 [9]:

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

где $\dot{\epsilon}$ – текущая скорость деформации;

$\dot{\epsilon}_{cm}$ – скорость деформации при статических испытаниях;

m_1 – степенной показатель, определяемый механическими свойствами материала [9].

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 [11].

В качестве исходных данных для моделирования были взяты результаты экспериментальных исследований процесса горячей 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 табл. 1 приведены названия материалов, их механические свойства и условия процесса резки параллельными ножами.

Результаты исследований

По результатам моделирования МКЭ были получены соответствующие зависимости силы резки, которые во всех рассмотренных случаях (табл. 1) имели завышенный результат в диапазоне порядка 15-43% по отношению к экспериментальным данным.

Такое явление вполне объяснимо, поскольку в классических методах расчета максимальной силы резки [1-3] 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.

Таблица 1

**Характеристика экспериментальных образцов
и условий реализации эксперимента**

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

* – в скобках указаны названия в соответствии с данными работы [1]

Величина коэффициентов перехода K_σ для каждого из экспериментальных образцов приведена в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента перехода K_σ

АА6066	Сталь 20	Сталь 45 (канатная сталь)	ШХ10	Сталь 75 (пружин- ная 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 скобках указаны названия в соответствии с данными работы [1]

В качестве сравнения полученных результатов на рис.1 показаны кривые удельного сопротивления срезу для 5 марок стали. При этом по 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 ножиц, которая, как было показано в работе [11], 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 было установлено, что с коэффициентом перехода наибольшие значения коэффициента корреляции имеют относительное удлинение δ и показатель упрочнения m_0 .

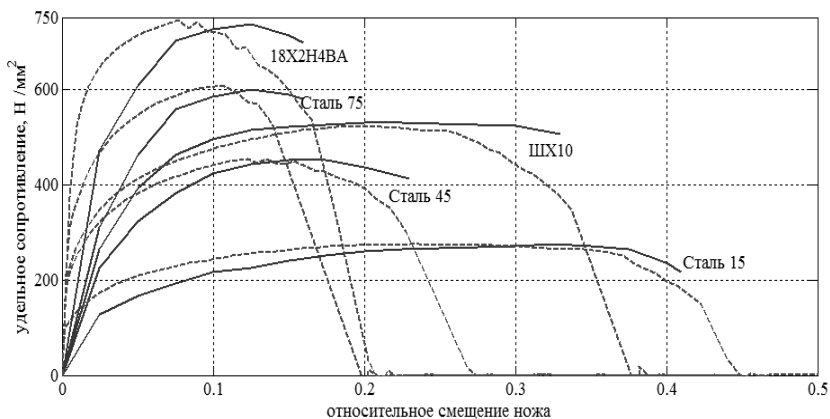


Рис. 1. Кривые удельного сопротивления срезу по данным работы [1] (—) и по результатам моделирования МКЭ при использовании коэффициента перехода, представленного в табл. 2 (---)

Последующая обработка с применением итерационных процедур и метода наименьших квадратов позволила получить уравнение регрессии в следующем виде:

$$K_{\sigma} = 0,867 - 1,345(|m_0 - 0,44|/|\delta - 14,32|)^{0,75}. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции в данном случае составил $R = 0,90265$.

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

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v K_{\sigma}, \quad (6)$$

Результаты последующего моделирования МКЭ с использованием алгоритма (2)-(6) по построению кривых текучести показали отклонение максимальных значений силы резки от экспериментальных данных не более 6,2%.

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. Данный метод может быть использован для расширения представления о процессах, протекающих в металле при разделении в холодном состоянии на ножницах. Также предложенный метод может явиться основанием для дальнейшего совершенствования методов расчета энергосиловых параметров и основных показателей качества при разделении на ножницах в холодном состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Целиков А.И. Прокатные станы: учебник для вузов / А.И. Целиков, В.В. Смирнов. – М.: Металлургиздат, 1958. – 432 с.
2. Иванченко Ф.К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів. Навч. посіб. / Ф.К. Иванченко, В.М. Гребеник, В.І. Ширяев. – К.: Вища шк., 1995. – 455 с.
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. Сатонин А.В. Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / А.В. Сатонин, Н. А. Кулик, А. А. Пеньчуков. – Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2009. – С. 149-155.
5. 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 СНУ ім. В. Даля. – 2013. – №1(14). – С. 69-76.
6. Saanouni K. 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.
7. Adamus J. 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.
8. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В.А. Огородников. – К.: Вища шк., 1983. – 175 с.
9. Ушаков М.В. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов / М.В. Ушаков, С.Ю. Ильяхин, И.А. Воробев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Ч. 2. – Тула: ТулГУ, 2010. – С. 89–93.
10. 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.
11. Боровик П.В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П.В. Боровик. / Сборник научных трудов // Вестник национального технического университета ХПИ. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76-80.

REFERENCES

1. Celikov, A.I., Smirnov, V.V., 1958. Prokatnye stany: uchebnik dlja vuzov. Moscow, Metallurgizdat, 432 p.
2. Ivanchenko, F.K., Grebenik, V.M., Shiryayev, V.I., 1995. Rozrahunok mashin i mehanizmiv prokatnih chev. Navch. posib, Kyiv, Vishha shk, 455 p.
3. Lukashin, N.D., Kohan, L.S., Jakushev, A.M., 2003. Konstrukcija i raschet mashin i agregatov metallurgicheskikh zavodov: uchebnik dlja vuzov. M.: IKC «Akademkniga», 456 p.
4. Satonin, A.V. Kulik, N.A, Pen'chukov, A.A., 2009. Mathematical modelling of energy-power parameters of cutting operation of bimetal ribbons, sheets and stripes, Resursozberigajuchi tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mashinobuduvanni [Resource Saving Technologies for Production and Pressure Shaping of Materials in Machine-Building], Book of scientific papers, Volodymyr Dahl East Ukrainian Na-

tional University, pp. 149-155.

5. Borovik, P.V., 2013. Mathematical simulation of the hot thick plate cutting process using the rotary shears, Resursozberigačii tehnologii virobnictva ta obrobki tiskom materialiv u mašinobuduvanni [Resource Saving Technologies for Production and Pressure Shaping of Materials in Machine-Building]: Journal of scientific papers, Lugansk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Issue 1(14), pp. 69-76.

6. Saanouni, K., Belamri, N., Autesserre, P., 2009. 3D numerical simulation of anisotropic thin sheet metal slitting process using fully coupled constitutive equations including ductile damage, International Journal of Material Forming, Vol 2, Issue 1, pp. 535-538.

7. Adamus, J., Lacki, P., Wiecekowsky, W., 2011. Numerical simulation of the fine blanking process of sheet titanium, Archives of metallurgy and materials, Vol 56, Issue 2, pp. 431-437.

8. Ogorodnikov, V.A., 1983. Ocenka deformiruemosti metallov pri obrabotke dav-leniem, Kyiv, Vishha shkola, 175 p.

9. Ushakov, M.V., Puhin, S.Ju., Vorobev, I.A., 2010. Uchet vlijanija skorosti deformacii i temperatury na proces-sy, proishodjashhie v zone pervichnoj deformacii pri rezanii metallov, Izvestija TulGU, Tehnicheskie nauki, Vol. 4, Ch. 2, Tula: TulGU, pp. 89-93.

10. Gohfel'd, D.A., Gecov, L.B., Kononov K.M., et al, 1996. Mehanicheskie svojstva stalej i splavov pri nestacionarnom nagruženii. Handbook, Ekaterinburg : UrO RAN, 408 p.

11. Borovik, P.V., 2011. Matematicheskoe modelirovanie processa rezki na nozhni-cah s uchetom uprugoj deformacii staniny, Sbornik nauchnyh trudov, Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta HPI, Har'kov, Vyp. 47, pp. 76-80.

Боровік П.В. Метод побудови кривих текучості матеріалу при моделюванні процесу холодного розділення на ножицях.

На базі відомих залежностей запропоновано метод отримання кривих текучості матеріалу при моделюванні методом скінчених елементів процесу розділення металу на ножицях в холодному стані. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними на прикладі семи марок сталі і одного алюмінієвого сплаву. Обґрунтовано необхідність використання коефіцієнта переходу для перерахунку напружень текучості при переході від умов розтягування до різку. Визначено розрахункові значення коефіцієнта переходу для розглянутих матеріалів і запропонована регресійна модель його розрахунку.

Ключові слова: крива текучості, ножиці, холодне різання, коефіцієнт переходу.

Borovik P.V. The building technique of stress-strain curves of material during simulation of cold separation process by shears with parallel blades.

This work aims on development of building technique of stress-strain curves of material during simulation of cold separation process by shears with parallel blades.

The method of selected points was implemented for drawing of stress-strain curves of material for adequate simulation of cold separation by shears with parallel blades.

Foregone dependences of mechanical properties of the tensile material were used for simulation of separation process on shears by a finite element method. The simulation results and experimental data for seven steels and one aluminum alloy have been compared.

It has established the necessity of the implementation of the conversion index for recalculating of yield stresses while changing of conditions from tension to shearing. The calculated values of conversion index for the considered materials have defined and regression model for its calculation proposed.

The method of selected points has proposed on the basis of foregone dependences for material yield for simulation of cold separation process by shears with parallel blades.

Keywords: stress-strain curve, shears, cold shearing, conversion index.