

УДК 669.017

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ УСЛОВИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ УГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ*

Лабер К.Б.¹, к.т.н., доцент

Дья Х.С.¹, д.т.н., профессор, директор Института обработки металлов давлением
и инженерии безопасности

Кавалек А.М.¹, к.т.н., доцент

Богатов А.А.², д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Обработка металлов
давлением» (omd@mtf.ustu.ru)

Нухов Д.Ш.², аспирант кафедры «Обработка металлов
давлением» (danis_nuchov@mail.ru)

¹Ченстоховский технологический университет

(42200, Польша, Ченстохова, ул. Домбровского, 69)

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. В работе представлены экспериментальные данные о влиянии температуры, степени и скорости деформации на сопротивление деформации углеродистой низколегированной стали. Исследование проводилось при испытании образцов на торсионном пластометре «STD 812» Ченстоховского технологического университета. По результатам исследования сопротивления деформации были построены кривые упрочнения углеродистой низколегированной стали при разных скоростях и температурах деформации. Общим для всех кривых упрочнения является высокая скорость упрочнения в начальный период деформации, когда действие релаксационных процессов не проявляется. Установлены важные для практического использования количественные характеристики влияния температурно-скоростных условий деформации на максимальное значение сопротивления деформации, его уменьшение в результате действия релаксационных процессов и на среднюю скорость упрочнения в интервале $0 < \varepsilon_u < \varepsilon_u^*$.

Ключевые слова: реологическое исследование, сопротивление деформации, кривые деформационного упрочнения, испытание на горячее кручение, углеродистая низколегированная сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-610-614

Сопротивление деформации стали в некоторый момент высокотемпературной деформации зависит от одновременно протекающих процессов деформационного и скоростного видов упрочнения, а также от динамической полигонизации и рекристаллизации, определяющих релаксационные процессы [1 – 3], результат действия которых можно представить в следующем виде:

$$\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_u, \dot{\varepsilon}_u, \theta, p, \tau, X_w). \quad (1)$$

Из уравнения видно, что сопротивление деформации зависит от двух механических переменных (степени ε_u и скорости $\dot{\varepsilon}_u$ деформации), двух физических переменных (температуры θ и гидростатического давления p),

* Исследование выполнено в рамках проектной части государственного задания № 11.1369.2014/К от 18.07.2014 (номер гос. регистрации 114122470051).

Исследование выполнено в рамках Программы повышения конкурентоспособности. Исследование поддержано программой 211 Правительства РФ, соглашение № 02.А03.21.0006.

одной кинематической переменной (времени τ) и одной переменной, определяющей структурную чувствительность стали X_w [1, 3 – 13]. Параметр p присутствует в уравнении (1) только при внешнем воздействии гидростатического давления на деформируемый материал. Параметр τ обычно выражается величиной $\varepsilon(\tau)$, характеризующей развитие деформации во времени [1, 3 – 13]. Величина сопротивления деформации при горячей обработке металлов давлением прежде всего зависит от температуры деформируемого материала и заданной скорости деформации. Влияние этих факторов на σ_s в момент времени, когда наступает равновесие процессов упрочнения и разупрочнения, было исследовано в работе [14]. Температура и скорость деформации в этом случае являются факторами, определяющими выбор рациональных температурно-скоростных условий процесса обработки давлением с целью формирования мелкозернистой структуры стали [1, 3 – 13].

Цель исследования заключалась в определении влияния степени и скорости деформации, а также тем-

Химический состав углеродистой низколегированной стали, %

Table 1. Chemical composition of the low-alloyed carbon steel, %

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo
0,21	0,97	0,10	0,014	0,009	0,26	0,07	0,17	0,024	0,014
N	Pb	Al _{мет}	As	Cb	V	Ti	B	Zn	Sn
0,0119	0,001	0,020	0,007	0,002	0,004	0,047	0,003	0,018	0,012

пературы на величину сопротивления деформации углеродистой низколегированной стали, имеющей химический состав, приведенный в табл. 1. Испытания образцов проводились на торсионном пластометре «STD 812» Ченстоховского технологического университета при температурах 800 – 1200 °С, скорости деформации 0,1, 1,0 и 10,0 с⁻¹, степени деформации от 0 до 6,5. Образцы для пластометрических исследований нагревались до температуры 1250 °С со скоростью 5 °С/с и выдерживались при этой температуре 30 с для обеспечения равномерности температуры в рабочей зоне образца. Затем они охлаждались до температуры деформации, выдерживались при этой температуре 10 с, подвергались кручению с требуемой скоростью деформации до достижения заданной степени деформации, а затем охлаждались до температуры окружающего воздуха со скоростью 20 °С/с. Исследование реологических свойств стали проводилось в вакууме при постоянных температуре и скорости деформации образца.

При испытании с высокой точностью поддерживались заданная температура и скорость деформации. Для вычисления степени и скорости деформации при кручении использовались выражения (2) и (3), а для определения сопротивления деформации уравнение (4) [2, 14, 15]:

$$\varepsilon_u = \frac{2\pi r N}{\sqrt{3}L} (\tau); \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{2\pi r \dot{N}}{\sqrt{3} \cdot 60L}; \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{\sqrt{3} \cdot 3M}{2\pi r^3}, \quad (4)$$

где r – радиус образца; L – длина образца; N – число оборотов кручения образца; $\dot{N}$ – частота вращения; M – крутящий момент.

На рис. 1 представлены кривые деформационного упрочнения стали в зависимости от степени и скорости деформации при температуре 1200 °С, полученные авторами по результатам испытаний образцов на торсионном пластометре «STD 812» Ченстоховского технологического университета.

Аналогичный характер имеют кривые упрочнения при других температурах в диапазоне от 800 до 1150 °С. Общим для всех кривых упрочнения является высокая скорость упрочнения в начальный период деформации, когда действие релаксационных процессов не проявляется. Затем, начиная от $\varepsilon_u = 0,2 - 0,3$, интенсивность упрочнения стали уменьшается, а при некотором значении $\varepsilon_u = \varepsilon_u^*$ в результате равновесия упрочнения и разупрочнения интенсивность упрочнения уменьшается до нуля, а сопротивление деформации достигает максимального значения – $\sigma_s^{\max}$. При $\varepsilon_u > \varepsilon_u^*$, температуре 800 – 900 °С и скорости деформации более 1,0 с⁻¹ равновесное состояние сохраняется, но с ростом температуры и уменьшением скорости деформации наблюдается падение сопротивления деформации на величину $\Delta\sigma_{s1}$. Однако затем, при некотором сочетании температурно-скоростных условий деформации, наблюдается повторное увеличение сопротивления деформации на величину $\Delta\sigma_{s2}$ (рис. 2). Значения ε_u^* , $\sigma_s^{\max}$, средней скорости упрочнения $\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}$, величины разупрочнения

$\Delta\sigma_{s1}$ и повторного упрочнения $\Delta\sigma_{s2}$ в зависимости от температуры и скорости деформации, полученные ав-

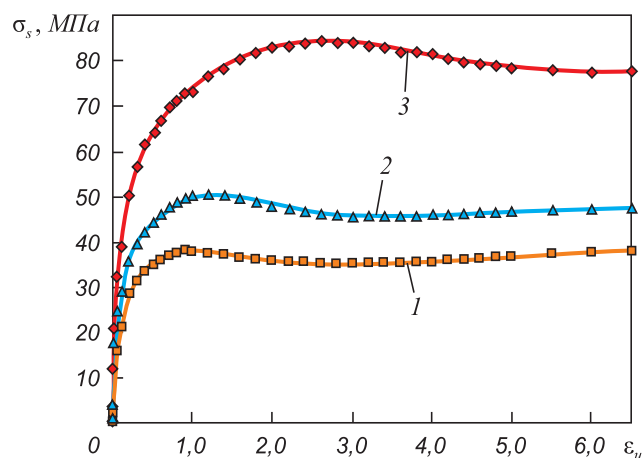


Рис. 1. Кривые упрочнения углеродистой низколегированной стали при температуре 1200 °С и ε_u , с⁻¹: 1 – 0,1; 2 – 1,0; 3 – 10,0

Fig. 1. Hardening curves for low-carbon steel at the temperature of 1200 °С and ε_u at s⁻¹: 1 – 0.1; 2 – 1.0; 3 – 10.0

Таблица 2

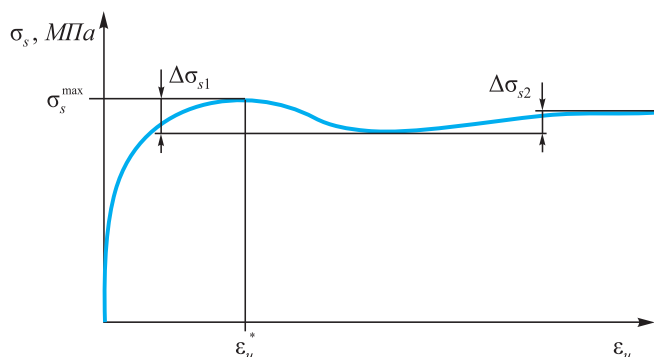


Рис. 2. К определению качественных характеристик кривой упрочнения стали

Fig. 2. To the definition of the quality characteristics of the curve of steel hardening

торами по результатам анализа кривых упрочнения (см. рис. 1), представлены в табл. 2.

Степень деформации ε_u^* , соответствующая равносному процессу, во всем температурном диапазоне увеличивается с ростом скорости деформации: при температуре 1200 °C ε_u^* увеличивается от 1,00 (при скорости деформации $\dot{\varepsilon}_u = 0,1$) до 2,75 (при $\dot{\varepsilon}_u = 10$), а при температуре 1100 °C от 1,00 до 3,0. При понижении температуры до 800 °C ε_u^* независимо от скорости деформации возрастает до 3,5. Максимальное значение сопротивления деформации $\sigma_s^{\max}$ при повышении температуры с 900 до 1200 °C, при исключении влияния скорости деформации, уменьшается в 2,7 раза, при повышении температуры с 1000 до 1200 °C – в 1,8 раза, а при изменении температуры с 1100 до 1200 °C – в 1,4 раза. Увеличение скорости деформации с 0,1 до 1,0 с⁻¹, при исключении влияния температуры, приводит к росту сопротивления деформации в 1,3 – 1,5 раза, увеличение скорости деформации с 0,1 до 10,0 с⁻¹ – в 1,2 – 1,7 раза.

Анализ влияния средней скорости роста сопротивления деформации $\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}$ на участке изменения ε_u от

нуля до ε_u^* мало зависит от температурно-скоростных условий деформации и составляет 35 – 50 МПа, но при температурах 800 – 900 °C с ростом скорости деформации до 10 с⁻¹ увеличивается до 70 МПа. Значение разупрочнения стали $\frac{\Delta\sigma_{s1}}{\sigma_s^{\max}}$ составляет около 10 %, но при температурах 800 – 900 °C падает до нуля. Повторное упрочнение стали $\Delta\sigma_{s2}$ незначительное, им можно пренебречь.

Выводы. По результатам исследования сопротивления деформации, проведенным на торсионном пластометре «STD 812» Ченстоховского технологического университета, были построены кривые упрочнения углеродистой низколегированной стали при разных скоростях ($\dot{\varepsilon}_u = 0,1; 1,0; 10,0$ с⁻¹) и температурах ($\theta = 800 – 1200$ °C) деформации. Общим для всех кри-

Значения ε_u^* , $\sigma_s^{\max}$, $\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}$, $\Delta\sigma_{s1}$ и $\Delta\sigma_{s2}$ в зависимости от температуры и скорости деформации

Table 2. Values of ε_u^* , $\sigma_s^{\max}$, $\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}$, $\Delta\sigma_{s1}$ and $\Delta\sigma_{s2}$ depending on temperature and strain rate

$\theta, ^\circ\text{C}$	Показатель	$\dot{\varepsilon}_u, \text{c}^{-1}$		
		0,1	1,0	10
1200	ε_u^*	1,00	1,25	2,75
	$\sigma_s^{\max}, \text{МПа}$	38	50	85
	$\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}, \text{МПа}$	38	40	30,9
	$\Delta\sigma_{s1}, \text{МПа}$	4	5	7
	$\Delta\sigma_{s2}, \text{МПа}$	0	2	4
1100	ε_u^*	1,0	1,5	3,0
	$\sigma_s^{\max}, \text{МПа}$	50	70	105
	$\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}, \text{МПа}$	50	47	35
	$\Delta\sigma_{s1}, \text{МПа}$	4	8	10
	$\Delta\sigma_{s2}, \text{МПа}$	3	2	0
1000	ε_u^*	1,25	2,0	3,0
	$\sigma_s^{\max}, \text{МПа}$	65	100	147
	$\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}, \text{МПа}$	52	50	49
	$\Delta\sigma_{s1}, \text{МПа}$	7	8	10
	$\Delta\sigma_{s2}, \text{МПа}$	2	0	0
900	ε_u^*	1,75	2,5	3,0
	$\sigma_s^{\max}, \text{МПа}$	96	140	183
	$\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}, \text{МПа}$	55	56	61
	$\Delta\sigma_{s1}, \text{МПа}$	10	10	8
	$\Delta\sigma_{s2}, \text{МПа}$	2	0	0
800	ε_u^*	3,5	3,5	3,5
	$\sigma_s^{\max}, \text{МПа}$	150	200	250
	$\frac{\sigma_s^{\max}}{\varepsilon_u^*}, \text{МПа}$	43	57	71
	$\Delta\sigma_{s1}, \text{МПа}$	0	0	0
	$\Delta\sigma_{s2}, \text{МПа}$	0	0	0

вых упрочнения является высокая скорость упрочнения в начальный период деформации, когда действие релаксационных процессов не проявляется. По достижению некоторого значения степени деформации $\varepsilon_u = \varepsilon_u^*$ в результате равновесия упрочнения и разупрочнения интенсивность упрочнения уменьшается до нуля,

а сопротивление деформации достигает максимального значения – $\sigma_s^{\max}$. При дальнейшем возрастании $\varepsilon_u > \varepsilon_u^*$ с ростом температуры ($\theta > 900^\circ\text{C}$) и понижением скорости деформации ($\dot{\varepsilon}_u < 1,0\text{ c}^{-1}$) наблюдается разупрочнение стали на величину $\Delta\sigma_{s1}$. Значение относительного разупрочнения стали $\frac{\Delta\sigma_{s1}}{\sigma_s^{\max}}$, независимо от темпе-

ратурно-скоростных условий деформации, составляет около 10 %, но при температурах 800 – 900 °C падает до нуля. Установлены важные для практического использования количественные характеристики влияния температурно-скоростных условий деформации на максимальное значение сопротивления деформаций $\sigma_s^{\max}$, его уменьшение на величину $\Delta\sigma_{s1}$ в результате действия релаксационных процессов и на среднюю скорость упрочнения в интервале $0 < \varepsilon_u < \varepsilon_u^*$. Повторное упрочнение стали на величину $\Delta\sigma_{s2}$, наблюдаемое при определенных температурно-скоростных условиях, незначительно и им можно пренебречь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dyja H., Gałkin A., Knapinski M. *Reologia metali odkształcanych plastycznie*, Seria Monografie, No. 190. Częstochowa: Wydawnictwo politechniki Częstochowskiej. 2010. P. 50 – 59.
2. Grosman F., Hadasik E. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. 2005. P. 11 – 12.
3. Вайнблат Ю.М. Диаграммы структурных состояний и карты структур алюминиевых сплавов // *Металлы*. 1982. № 2. С. 82 – 88.
4. Вайнблат Ю.М., Клепачевская С.Ю., Ланцман П.Ш. Диаграммы структурных состояний и рекристаллизации горячедоформ-

мированного сплава АК4-1 // *Физика металлов и металловедение*. 1977. Т. 44. Вып. 4. С. 834.

5. *Физическое металловедение* // С.В. Грачев, В.Р. Бараз, А.А. Богатов и др. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 534 с.
6. Богатов А.А., Кушнарв А.В. Моделирование термомеханического состояния металла и эволюции зеренной структуры в механике обработки металлов давлением // *Производство проката*. 2013. № 6. С. 42 – 48.
7. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. *Физические основы пластической деформации*. – М.: Металлургия, 1984. – 584 с.
8. Третьяков А.В., Зюзин В.И. *Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением*. – М.: Металлургия, 1973. – 223 с.
9. Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г. *Сопротивление деформации сталей и сплавов*. – В кн.: *Теория и практика металлургии*: Науч. тр. НИИМ. Сб. № 11. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд-во, 1970. С. 101– 123.
10. Коновалов А.В. Построение динамических моделей сопротивления металлов пластической деформацией методами теории идентификации // *Известия АН СССР. Металлы*. 1984. № 6. С. 178 – 181.
11. Коновалов А.В., Селиванов Г.С., Антошечкин Б.М. О динамической модели сопротивления металла пластической деформации // *Известия АН СССР. Металлы*. 1987. № 4. С. 122 – 127.
12. Соколов Л.Н., Ефимов В.Н. Об учете разупрочнения при выводе аналитических зависимостей для сопротивления деформации сталей // *Известия АН СССР. Металлы*. 1980. № 1. С. 163 – 166.
13. Богатов А.А., Мижирицкий И.О., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
14. Zener C., Hollomon J.N. Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steels // *J. Appl. Phys.* 1944. Vol. 15. С. 22.
15. Gałkin A.M. *Badania plastometryczne metali i stopów*, Politechnika Częstochowska, Seria Monografie, No. 15. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1990.

Поступила 29 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 9, pp. 610–614.

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HIGH-SPEED CONDITIONS ON RESISTANCE OF DEFORMATION OF THE CARBON LOW-ALLOYED STEEL

K.B. Laber¹, H.S. Dyja¹, A.M. Kawalek¹, A.A. Bogatov², D.Sh. Nukhov²

¹ Częstochowa University of Technology (CUT) (Politechnika Częstochowska), Częstochowa, Poland

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The work presents experimental data on influence of temperature, degree and speed of deformation on resistance of deformation of the carbonaceous low-alloyed steel. The research was conducted at test of samples on the torsion STD 812 plastometer of Chentstokhovskiy University of Technology. According to the study of deformation resistance, hardening curves were constructed for carbon low-alloyed steel at different speeds and temperatures of deformation. Common to all curves is a high hardening speed of the hardening in the initial period of deformation when the action of relaxation processes is not apparent. The authors have installed important for the practical use quantitative characteristics of the influence of the temperature-rate conditions of deformation on the maximum value of the deformation resistance reduction as a result of relaxation processes and on the average speed of hardening at the interval $0 < \varepsilon_u < \varepsilon_u^*$.

Keywords: rheological research, deformation resistance, curves of deformation hardening, test on hot torsion, carbon low-alloyed steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-9-610-614

REFERENCES

1. Dyja H., Gałkin A., Knapinski M. *Reologia metali odkształcanych plastycznie*. Seria Monografie, no. 190. Częstochowa: Wydawnictwo politechniki Częstochowskiej, 2010, pp. 50–59. (In Polish).
2. Grosman F., Hadasik E. *Technologiczna plastyczność metali. Badania plastometryczne*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2005, pp. 11–12. (In Polish).
3. Vainblat Yu.M. Diagrams of structural states and maps of structures of aluminum alloys. *Metally*. 1982, no. 2, pp. 82–88. (In Russ.).
4. Vainblat Yu.M., Klepachevskaya S.Yu., Lantsman P.Sh. Diagrams of structural states and recrystallization of hot-deformed alloy AK4-1. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1977, vol. 44, Issue 4, p. 834. (In Russ.).
5. Grachev S.V., Baraz V.R., Bogatov A.A. etc. *Fizicheskoe metallovedenie* [Physical metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2001, 534 p. (In Russ.).

6. Bogatov A.A., Kushnarev A.V. Modeling of the thermomechanical state of the metal and the evolution of grain structure in the mechanics of metal forming. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 6, pp. 42–48. (In Russ.).
 7. Polukhin P.I., Gorelik S.S., Vorontsov V.K. *Fizicheskie osnovy plasticheskoi deformatsii* [Physical bases of plastic deformation]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 584 p. (In Russ.).
 8. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke metallov davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys at metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 223 p. (In Russ.).
 9. Andreyuk L.V., Tyulenev G.G. Strain resistance of steels and alloys. In: *Teoriya i praktika metallurgii: Nauch. tr. NIIM. Sb. no. 11* [Theory and practice of metallurgy: Sci. Papers of NIIM. Coll. No. 11]. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe kn. izd-vo, 1970, pp. 101–123. (In Russ.).
 10. Konovalov A.V. Plotting of dynamic models of the plastic deformation resistance of metals by identification-theory methods. *Russian metallurgy. Metally*. 1984, no. 6, pp. 173–179.
 11. Konovalov A.V., Selivanov G.S., Antoshechkin B.M. Dynamic modelling of a metal's resistance to plastic deformation. *Russian metallurgy. Metally*. 1987, no. 4, pp. 122–127.
 12. Sokolov L.N., Efimov V.N. On account of softening in the derivation of analytical dependences of resistance on deformation. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1980, no. 1, pp. 163–166. (In Russ.).
 13. Bogatov A.A., Mizhiritskii I.O., Smirnov S.V. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem* [Resource of metal plasticity under pressure treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 144 p. (In Russ.).
 14. Zener C., Hollomon J.N. Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steels. *J. Appl. Phys.*, 1944, vol. 15, pp. 22.
 15. Galkin A.M. *Badania plastometryczne metali i stopów*, *Politechnika Częstochowska. Seria Monografie*, no. 15. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 1990. (In Polish).
- Acknowledgements.** The work was performed within the project part of state job in the field of scientific activity no. 11.1369.2014/K dated 18.07.2014 (State registration no.: 114122470051) and financially supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, agreement no. 02.A03.21.0006. The study was carried out in the framework of the Program of competitiveness increase.
- Information about the authors:**
- K.B. Laber**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor
H.S. Dyja, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Metal Forming and Engineering Sekuriti
A.M. Kawalek, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor
A.A. Bogatov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metal Forming" (omd@mtf.ustu.ru)
D.Sh. Nukhov, Postgraduate of the Chair "Metal Forming" (danis_nuchov@mail.ru)

Received December 29, 2016