

УДК 621.735.3

Жбанков Я. Г.
Чикота Я. М.
Сасов П. А.

ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Время, затрачиваемое на подготовку технологического процесса, является важным экономическим параметром современного производства. Подготовка технологического процесса неразрывно связана с необходимостью его моделирования. Наиболее часто применяемым в современном производстве методом моделирования процессовковки крупных поковок является метод конечных элементов. Данный метод основан на учете большого количества реологических свойств деформируемого материала, основным из которых является кривые течения металла при различных температурно-скоростных условия.

В случае проведения экспресс моделирования какого-либо процессаковки необходим полный набор кривых течения металла при различных температурно-скоростных условиях. Обычно данная информация о материале получается на основании проведения экспериментов по растяжению образцов. В случае, если необходимо провести моделирование процессаковки слитка из материала, информации о котором нет в базе данных используемой программы, разработчик сталкивается с проблемой дополнительных экспериментальных исследований. Необходимо будет выплавить слиток из данного материала, изготовить из него образцы и провести многочисленные испытания. Это требует значительных материальных и временных затрат.

В то же время существует для большого количества материалов, используемых в ковке, стандартные характеристики в виде предела прочности и текучести для определенных температур. Разработка метода, позволяющего по таким характеристикам строить кривые течения металла в широком диапазоне температурно-скоростных условий деформирования, является весьма актуальной задачей и позволит существенно сократить время подготовки производства.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования и работы отечественных и зарубежных авторов, зависимость сопротивления деформированию при постоянной температуре корректно описывается степенной зависимостью, предложенной Людвигом П. [1]:

$$\sigma_s = C \cdot e^n. \quad (1)$$

Для построения кривой течения металла, описывающей зависимостью, приведенной выше, достаточно знать предел прочности σ_B и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – условное напряжение, которое соответствует относительному остаточному удлинению, равному 0,2%. При таких деформациях относительное остаточное удлинение отличается от истинной логарифмической деформации не более, чем на 0,1%, поэтому:

$$\begin{aligned} e_{0,2} &\approx \varepsilon_{0,2} / 100 = 0,002, \\ \sigma_{0,2} &= C \cdot 0,002^n. \end{aligned} \quad (2)$$

В работах [2–4], анализируя устойчивость деформирования, показано, что если модель материала следует аппроксимации Людвиг (1), то образование шейки при растяжении начинается при логарифмической деформации, равной n . Таким образом:

$$\sigma_B = C n^n. \quad (3)$$

Имеем два уравнения с двумя неизвестными, решая которые определяем коэффициенты C и n . Данная методика описана в работе [1]. Такое определение кривой течения металла будет вносить определенные погрешности, но отклонение теоретической кривой от экспериментальной не превышает 25–30% при определенных деформациях [1]. Однако, такие кривые будут получены строго для определенной температуры и для определенной скорости деформации. То есть анализ технологии усложняется необходимостью использования большого количества экспериментальных данных при различных температурах и скоростях. Свести необходимые данные до минимума является важной научно-практической задачей.

Изменение сопротивления деформации при изменении скорости деформации можно определить аналитически. Так, например Губкин С. И. и Рейто предложили зависимости, получившие теоретическое и экспериментальное подтверждение в работах [5–7]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^n,$$

$$\sigma = \sigma_0 + A_1 \lg \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right).$$

Витман В. В. и Степанов В. А. вывели формулу, дающую двойную логарифмическую зависимость [5]:

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = n \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}. \quad (4)$$

Людвик П. Л. предложил зависимость сопротивления деформации от скорости деформации в полулогарифмическом виде:

$$\sigma = \sigma_0 + c \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right). \quad (5)$$

Полухин П. И. в своей работе [6] отмечает, что коэффициент n , показывающий степень влияния скорости на сопротивление деформации, в значительной мере определяется температурой процесса. Также в его работе отмечается, что он является постоянным для определенного диапазона скоростей. В ряде работ зависимость скоростного показателя от гомологической температуры авторы приняли линейно. Так, например, Соколов Л. Д. предлагает его определять по следующей формуле:

$$n = m \frac{T}{T_{нл}},$$

где m – константа материала, которую Зайков М. А. определил равную 3 для всех материалов и скоростей.

По Зотееву В. С. $n = \alpha + \beta T$, где α, β – константы материала.

Витман В. В. и Златин М. А., учитывая влияние температуры и скорости деформации для определения сопротивления деформированию, предложили следующую зависимость:

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = m(T - T_0) \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right). \quad (5)$$

Наиболее распространена и часто используется зависимость (4). В работе [7] приведены значения коэффициента n – коэффициента пропорциональности для различных сталей (табл. 1). Авторы устанавливали данный коэффициент для множества материалов. Видно, что для некоторых сталей данный коэффициент одинаков при одной и той же температуре, для других он существенно отличается.

В некоторых работах зависимость коэффициента n от температуры линейна, там она не зависит от вида стали и скорости деформации (табл. 2).

Таблица 1

Значение коэффициента скоростной чувствительности различных материалов [7]

Материал	800 ⁰ С		900 ⁰ С		1000 ⁰ С		1100 ⁰ С		1200 ⁰ С	
	$\sigma_{0,2}$, МПа	n	$\sigma_{0,2}$, МПа	n	$\sigma_{0,2}$, МПа	K_{np}	$\sigma_{0,2}$, МПа	n	$\sigma_{0,2}$, МПа	n
25	203	0,129	149	0,156	105	0,175	76	0,184	-	-
45	205	0,11	141	0,12	108	0,13	81	0,17	61	0,2
50	-	-	172	0,12	124	0,135	93	0,151	66	0,183
60С2	241	0,12	171	0,13	133	0,13	104	0,137	80	0,135
У7	147	0,12	122	0,14	83	0,18	58	0,2	-	-
У10	224	0,11	133	0,12	104	0,13	73	0,18	50	0,23
X12	400	0,08	225	0,14	126	0,2	71	0,26	40	0,32
P18	399	0,07	264	0,114	174	0,16	115	0,2	76	0,25
12X13	-	-	189	0,126	138	0,213	88	0,21	26	0,2
30X13	246	0,14	186	0,16	164	0,18	109	0,2	85	0,212
12X18Н9Т	-	-	256	0,06	194	0,09	144	0,1	102	0,115
40X9С2	-	-	143	0,132	202	0,112	133	0,15	87	0,17
45X14Н14В2М	940	0,03	680	0,09	400	0,2	247	0,22	145	0,24

Таблица 2

Значение коэффициента скоростной чувствительности сталей

Температура, °С	800	900	1000	1100	1200
n	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20

Наблюдается явное противоречие с данными работы [7], хотя попытка упорядочить и вывести закономерности коэффициента чувствительности скорости деформации является практически очень важной. Имея возможность определить кривую течения металла от деформации при определенной температуре и скорости деформации по стандартным характеристикам, возможно используя зависимость, предложенную С. И. Губкиным и Рейто, получить множество кривых для практически любой скорости деформации.

Актуальным является уточнение коэффициента n для различных материалов и температурно-скоростных условий, получение обобщенных данных.

На основании имеющихся экспериментальных данных, полученных по результатам испытаний на растяжение и осадку различных типов материалов при различных температурно-скоростных условиях, определим величины коэффициента n . Экспериментальные данные были получены в лабораторных условиях ОАО «Русполимет» и взяты из литературы [8–21].

Коэффициент n определялся по следующей зависимости:

$$n = \frac{\ln \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}}{\ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}}$$

В результате обработки экспериментальных данных получено множество значений коэффициента n при различных температурно-скоростных условиях деформирования для множества видов материалов. Установлено, что скоростная чувствительность низколегированных и углеродистых сталей находится на одном уровне и достаточно существенно отличается от чувствительности к скорости деформации у легированных и высоколегированных сталей. Кроме того установлено, что диапазон скоростей деформации также оказывает существенное влияние на чувствительность к скорости у всех материалов. Значение коэффициента n для низколегированных и углеродистых сталей при различных скоростях деформации приведено в табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициента скоростной чувствительности n от температуры для различных диапазонов скоростей (низколегированные и углеродистые стали)

$\dot{\epsilon} = 0,001 \dots 0,01 \text{ c}^{-1}$		$\dot{\epsilon} = 0,01 \dots 0,1 \text{ c}^{-1}$		$\dot{\epsilon} = 0,1 \dots 1 \text{ c}^{-1}$	
n	$T, ^\circ\text{C}$	n	$T, ^\circ\text{C}$	n	$T, ^\circ\text{C}$
0,2774	1200	0,1295	1200	0,1129	1200
0,2624	1150	0,1245	1150	0,1029	1150
0,2474	1100	0,1195	1100	0,0929	1100
0,2324	1050	0,1145	1050	0,0829	1050
0,2174	1000	0,1095	1000	0,0729	1000
0,2024	950	0,1045	950	0,0629	950
0,1874	900	0,0995	900	0,0529	900
0,1724	850	0,0945	850	0,0429	850
0,1574	800	0,0895	800	0,0329	800

На рис. 1 приведены графические зависимости коэффициента n от температуры для группы низколегированных и углеродистых сталей. На основании статистической обработки получены линейные зависимости, описывающие влияние температуры и скорости деформации на коэффициент n .

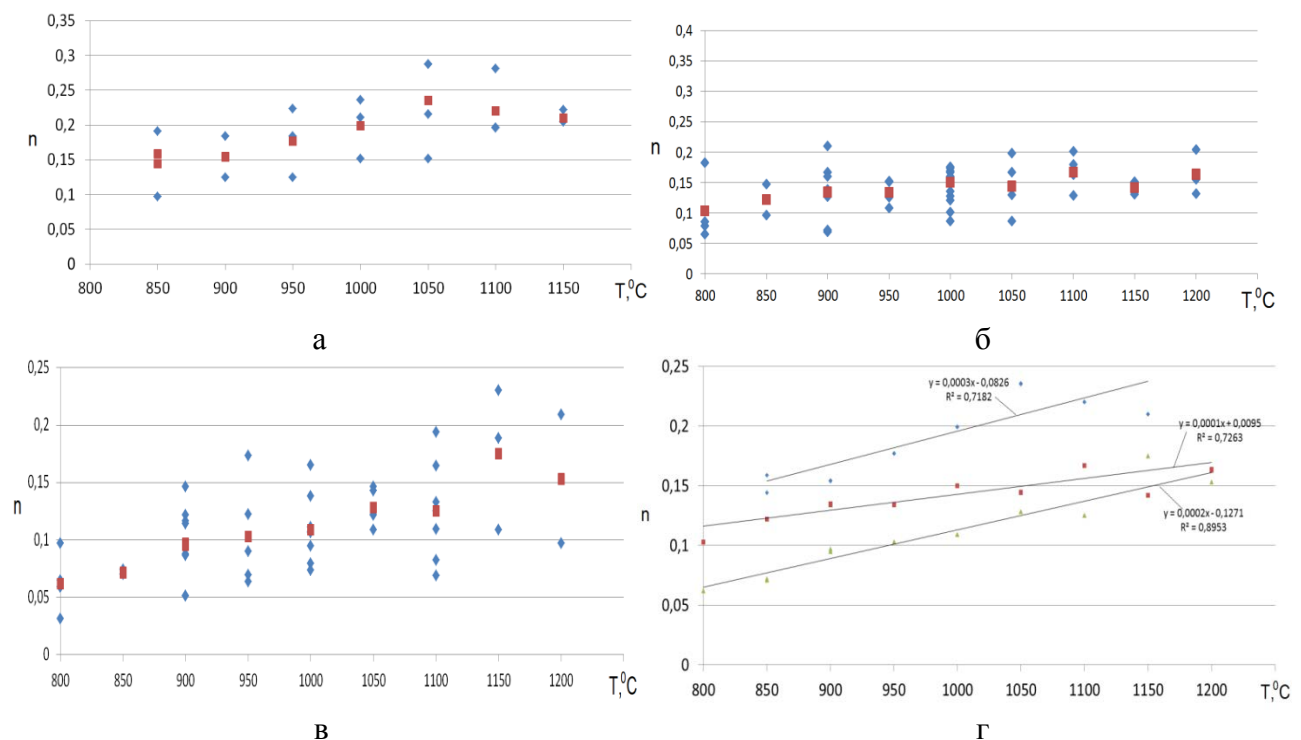


Рис. 1. Зависимость скоростного коэффициента чувствительности от температурно-скоростных условий для низколегированных и углеродистых сталей:

а – $\dot{\epsilon} = 0,001 \dots 0,01 \text{ c}^{-1}$, б – $\dot{\epsilon} = 0,01 \dots 0,1 \text{ c}^{-1}$, в – $\dot{\epsilon} = 0,1 \dots 1 \text{ c}^{-1}$, г – общий график

Аналогичные данные получены для высоколегированных хромом, никелем, молибденом и вольфрамом сталей (табл. 4).

Таблица 4

Значение коэффициента скоростной чувствительности n от температуры для различных диапазонов скоростей (высоколегированные стали)

$\dot{\epsilon} = 0,001 \dots 0,01 \text{ c}^{-1}$		$\dot{\epsilon} = 0,01 \dots 0,1 \text{ c}^{-1}$		$\dot{\epsilon} = 0,1 \dots 1 \text{ c}^{-1}$	
n	$T, ^\circ\text{C}$	n	$T, ^\circ\text{C}$	n	$T, ^\circ\text{C}$
0,2261	1200	0,2296	1200	0,1843	1200
0,2061	1150	0,2146	1150	0,1643	1150
0,1861	1100	0,1996	1100	0,1443	1100
0,1661	1050	0,1846	1050	0,1243	1050
0,1461	1000	0,1696	1000	0,1043	1000
0,1261	950	0,1546	950	0,0843	950
0,1061	900	0,1396	900	0,0643	900
0,0861	850	0,1246	850	0,0443	850
0,0661	800	0,1096	800	0,0243	800

На рис. 2 показано сопоставление коэффициентов n стали различных групп от температуры в различных скоростных диапазонах. Видно, что у легированных сталей более ярко выраженная чувствительность к скорости деформации при повышении температуры.

Для определения адекватности полученных результатов проверим разработанную методику на одном из исследуемых материалов. Возьмем для примера материал 1 (высоколегированную сталь). Химический состав представлен в табл. 5.

Таблица 5

Химический состав высоколегированной стали

C	W	Cr	V	Mn	Si	Ni	Mo	Cu	S	P
0,95	18,41	4,35	0,99	0,31	0,51	0,08	0,11	0,09	0,022	0,043

Возьмем экспериментально полученные значения предела прочности и предела текучести при температурах 1000°C и 1100°C при скорости деформации, равной $0,01 \text{ c}^{-1}$. Предел прочности при 1000°C равен 195 МПа, предел текучести 100 МПа, для температуры 1100°C – соответственно 120 МПа и 80 МПа. Воспользовавшись уравнениями (1–3), определим коэффициент аппроксимации кривых течения металла, они составят соответственно для температур 1000°C ($C = 254, n = 0,15$) и для температур 1100°C ($C = 254, n = 0,15$).

Подставив эти значения коэффициентов в выражение (1), получим теоретические кривые течения металла при соответствующих температурах и скорости. Результаты приведены на рис. 3. Видно, что отклонение теоретических значений от экспериментальных находится в пределах 15%.

Для проверки адекватности коэффициентов, отражающих влияние скорости деформации на напряжение течения металла, определим теоретическое положение кривых течения металла, на графиках, полученных экспериментально для различных скоростей деформации: $0,001 \text{ c}^{-1}$ и 1 c^{-1} .

Построить кривые течения при различных скоростях деформации возможно на основании полученных теоретических кривых с применением выражения (4) и графиков рис. 2 для определения коэффициента чувствительности. Произведя несложные математические вычисления, получим теоретические значения напряжения текучести материала при скоростях деформации $0,001$ и 1 c^{-1} . Нанеся теоретические значения на экспериментально полученные графики (рис. 3, б, в), видно, что теоретически влияние скорости деформаций достаточно точно описывается. Отклонение теоретических значений напряжения течения металла находится в пределах 30%.

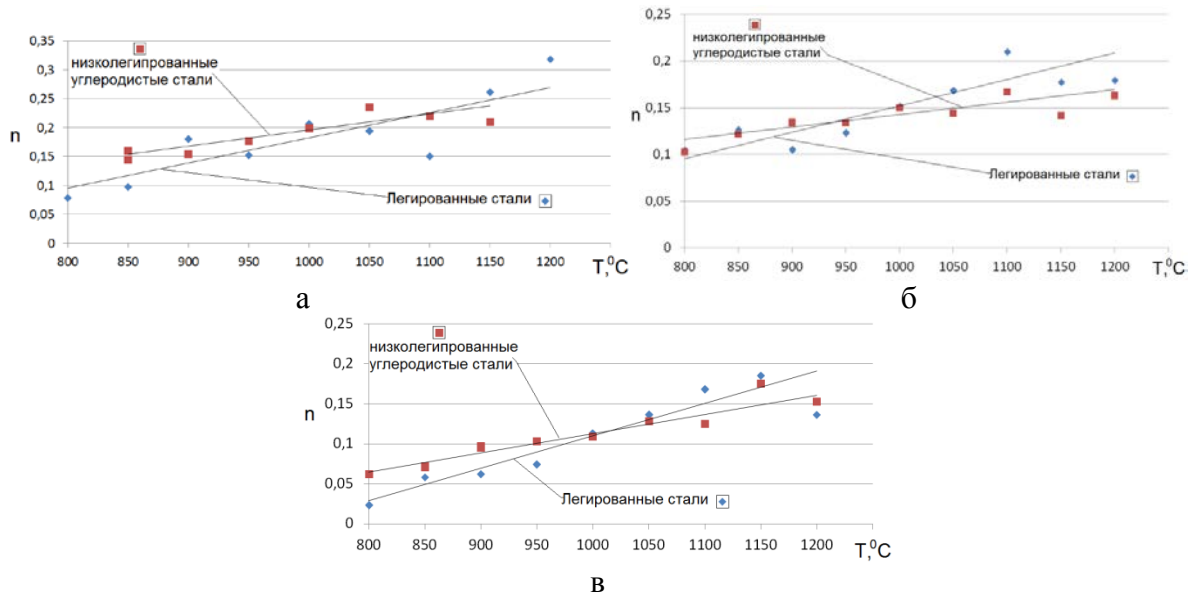


Рис. 2. Зависимость скоростного коэффициента чувствительности от температурно-скоростных условий для различных групп материалов:

а – $\dot{\epsilon} = 0,001 \dots 0,01 \text{ c}^{-1}$, б – $\dot{\epsilon} = 0,01 \dots 0,1 \text{ c}^{-1}$, в – $\dot{\epsilon} = 0,1 \dots 1 \text{ c}^{-1}$

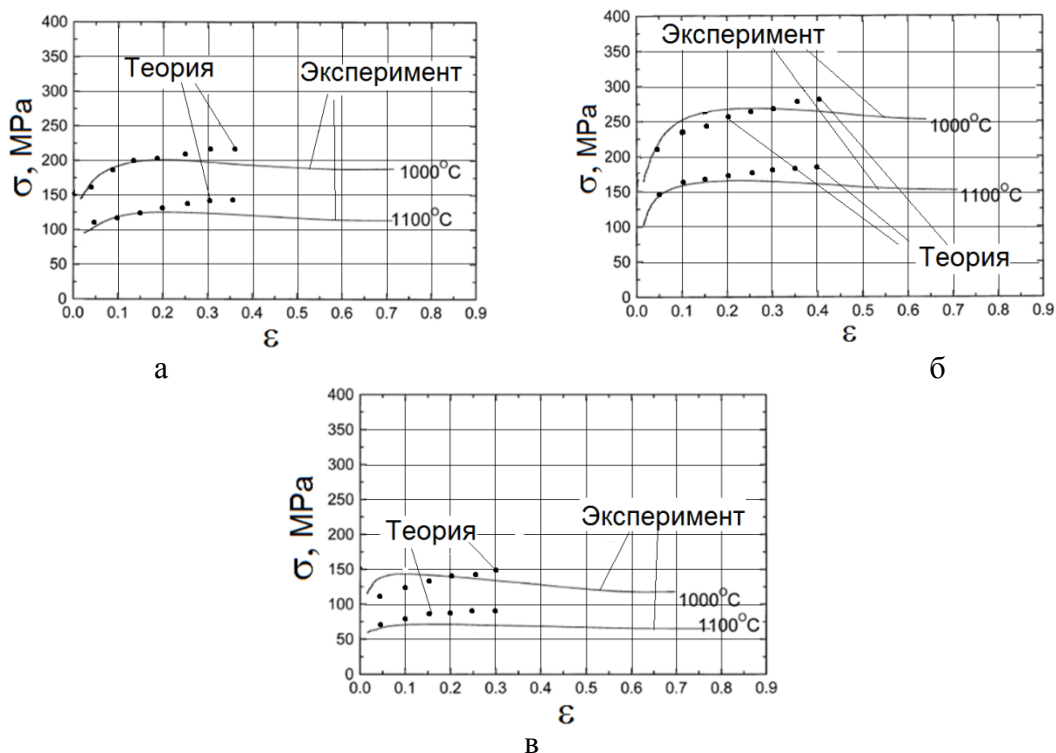


Рис. 3. Кривые течения металла при различных температурно скоростных условиях: а – $\dot{\epsilon} = 0,1 \text{ c}^{-1}$, б – $\dot{\epsilon} = 1 \text{ c}^{-1}$, в – $\dot{\epsilon} = 0,001 \text{ c}^{-1}$

ВЫВОДЫ

В работе предложен метод построения кривых течения при высоких температурах деформирования, основанный на использовании экспериментальных данных в виде предела прочности и предела текучести материала. Используя аппроксимацию кривой течения, предложенной П. Людвигом, и зависимость изменения сопротивления деформации от изменения скорости деформации, предложенную Витманом В. В. и Степановым В. А., можно получать множество кривых течения металла по ограниченному количеству экспериментальных данных.

В работе определены зависимости коэффициента пропорциональности из закона Витмана В. В. и Степанова В. А. от химического состава материала и диапазона скоростей деформаций.

Показано, что построение кривых течения по пределу прочности и пределу текучести по предлагаемому методу достаточно точно. Данные, полученные таким образом, отклоняются от экспериментальных до 30%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грушко А. В. *Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам* / А. В. Грушко // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія Машинобудування. – №60. – С. 223–227.
2. Томсен Э. *Механика пластических деформаций при обработке металлов* / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобояши. – М. : Машиностроение, 1969. – 504 с.
3. Агеев Н. П. *Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременной ползучести* / Н. П. Агеев, С. И. Каротушин. – М. : Металлургия, 1968. – 280 с.
4. Витман В. В. *О влиянии скорости деформирования на хладноломкость стали* / В. В. Витман, В. А. Степанов // *Журнал технической физики*. – 1939. – Т. 9. – Вып. 12. – С. 1069–1077.
5. Полухин П. И. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов* / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1976. – 488 с.
6. *Ковка и штамповка: справочник : в 4 т. / под ред. Е. И. Семенова [и др.]*. – Т. 1. – М. : Машиностроение, 1985. – 567 с.
7. *Study on hot deformation characteristics of 12%Cr ultra-super-critical rotor steel using processing maps and Zener–Hollomon parameter* / Zhenhua Wang, Wantang Fu, Baozhong Wang, Wenhui Zhang, Zhiqing Lva, Ping Jiang // *Materials Characterization*. – 2010. – Vol. 61. – Issue 1. – P. 25–30.
8. *Influences of silicon on the work hardening behavior and hot deformation behavior of Fe–25wt%Mn–(Si, Al) TWIP steel* / Dejun Li, Yaorong Feng, Shengyin Song, Qiang Liu, Qiang Bai, Fengzhang Ren, Fengshou Shanguan // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 618. – P. 768–775.
9. *Hot deformation characteristic and processing map of superaustenitic stainless steel S32654* / Pu Enxiang, Zheng Wenjie, Xiang Jinzhong, Song Zhigang, Li Ji // *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. – 2014. – Vol. 598. – P. 174–182.
10. *Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression* / De-Ning Zou, Kun Wu, Ying Han, Wei Zhang, Bao Cheng, Guan-Jun Qiao // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 51. – P. 975–982.
11. *Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade* / Eli Saúl Puchi-Cabrera, Jean-Dominique Guérin, Mirentxu Dubar, Mariana H. Staia, Jacky Lesage, Didier Chicot // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 62. – P. 255–264.
12. *Study on hot deformation behaviour and processing maps of low carbon bainitic steel* / Zhinan Yang, Fucheng Zhang, Chunlei Zheng, Ming Zhanga, Bo Lv, Lin Qu // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 66. – P. 258–266.
13. *Hot deformation behaviour of an Nb–N-bearing austenitic stainless steel biomaterial* / E. S. Silva, R. C. Sousa, A. M. Jorge Jr., O. Balancin // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 524. – P. 69–75.
14. *Processing maps and hot workability of Super304H austenitic heat-resistant stainless steel* / Shuping Tan, Zhenhua Wang, Shichang Cheng, Zhengdong Liu, Jiecai Han, Wantang Fu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 517. – Issues 1–2. – P. 312–315.
15. *Staker M. R. The effects of strain, strain rate and temperature on grain refinement and hot workability of type 305 stainless steel* / M. R. Staker, N. J. Grant // *Materials Science and Engineering*. – 1985. – Vol. 75. – Issues 1–2. – P. 137–150.
16. *Lin Y. C. Effects of strain on the workability of a high strength low alloy steel in hot compression* / Y. C. Lin, Ge Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 523. – Issues 1–2. – P. 139–144.
17. *Optimization of Hot Workability in Superaustenitic Stainless Steel 654SMO* / En-xiang Pu, Wen-Jie Zheng, Zhi-Gang Song, Jin-Zhong Xiang, Xian-Ping Wei // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2014. – Vol. 21. – Issue 10. – P. 975–982.
18. *Richard K. C. Nkhoma Hot workability of AISI 321 and AISI 304 austenitic stainless steels* / Richard K. C. Nkhoma, Charles W. Siyasiya, Waldo E. Stumpf // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 595. – P. 103–112.
19. *El Mehtedi M. Hot workability in process modeling of a bearing steel by using combined constitutive equations and dynamic material model* / M. El Mehtedi, F. Gabrielli, S. Spigarelli // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 53. – P. 398–404.
20. *Wang Xiaofeng Influence of cerium on hot workability of 00Cr25Ni7Mo5N super duplex stainless steel* / Wang Xiaofeng, Chen Weiqing // *Journal of Rare Earths*. – 2010. – Vol. 28. – № 2. – P. 295–300.
21. *Akbarzadeh A. Hot workability of a high carbon high chromium tool steel* / A. Akbarzadeh, S. Naghdy // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 46. – P. 654–659.

REFERENCES

1. Grushko A. V. *Opređenje krivoj tečenija materijala po standartnim mehanicheskim karakteristikam* / A. V. Grushko // *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini «Kiivs'kij politehničnij institut»*. Serija Mashinobuduvannja. – №60. – S. 223–227.

2. Tomsen Je. *Mehanika plasticheskikh deformacij pri obrabotke metallov* / Je. Tomsen, Ch. Jang, Sh. Kobojashi. – M. : Mashinostroenie, 1969. – 504 s.
3. Ageev N. P. *Mehanicheskie ispytaniya metallov pri vysokih temperaturah i kratkovremennoj polzuchesti* / N. P. Ageev, S. I. Karotushin. – M. : Metallurgija, 1968. – 280 s.
4. Vitman V. V. *O vlijanii skorosti deformirovaniya na hladnolomkost' stali* / V. V. Vitman, V. A. Stepanov // *Zhurnal tehniczeskoj fiziki*. – 1939. – T. 9. – Vyp. 12. – S. 1069–1077.
5. Poluhin P. I. *Soprotivlenie plasticheskoy deformacii metallov i splavov* / P. I. Poluhin, G. Ja. Gun, A. M. Galkin. – M. : Metallurgija, 1976. – 488 s.
6. *Kovka i shtampovka: spravochnik : v 4 t. / pod red. E. I. Semenova [i dr.]*. – T. 1. – M. : Mashinostroenie, 1985. – 567 s.
7. *Study on hot deformation characteristics of 12%Cr ultra-super-critical rotor steel using processing maps and Zener–Hollomon parameter* / Zhenhua Wang, Wantang Fu, Baozhong Wang, Wenhui Zhang, Zhiqing Lva, Ping Jiang // *Materials Characterization*. – 2010. – Vol. 61. – Issue 1. – P. 25–30.
8. *Influences of silicon on the work hardening behavior and hot deformation behavior of Fe–25wt%Mn–(Si, Al) TWIP steel* / Dejun Li, Yaorong Feng, Shengyin Song, Qiang Liu, Qiang Bai, Fengzhang Ren, Fengshou Shangguan // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2015. – Vol. 618. – P. 768–775.
9. *Hot deformation characteristic and processing map of superaustenitic stainless steel S32654* / Pu Enxiang, Zheng Wenjie, Xiang Jinzhong, Song Zhigang, Li Ji // *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. – 2014. – Vol. 598. – P. 174–182.
10. *Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression* / De-Ning Zou, Kun Wu, Ying Han, Wei Zhang, Bao Cheng, Guan-Jun Qiao // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 51. – P. 975–982.
11. *Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade* / Eli Saúl Puchi-Cabrera, Jean-Dominique Guérin, Mirentxu Dubar, Mariana H. Staia, Jacky Lesage, Didier Chicot // *Materials & Design*. – 2014. – Vol. 62. – P. 255–264.
12. *Study on hot deformation behaviour and processing maps of low carbon bainitic steel* / Zhinan Yang, Fucheng Zhang, Chunlei Zheng, Ming Zhang, Bo Lvc, Lin Qu // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 66. – P. 258–266.
13. *Hot deformation behaviour of an Nb–N-bearing austenitic stainless steel biomaterial* / E. S. Silva, R. C. Sousa, A. M. Jorge Jr., O. Balancin // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – Vol. 524. – P. 69–75.
14. *Processing maps and hot workability of Super304H austenitic heat-resistant stainless steel* / Shuping Tan, Zhenhua Wang, Shichang Cheng, Zhengdong Liu, Jiecai Han, Wantang Fu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 517. – Issues 1–2. – P. 312–315.
15. *Staker M. R. The effects of strain, strain rate and temperature on grain refinement and hot workability of type 305 stainless steel* / M. R. Staker, N. J. Grant // *Materials Science and Engineering*. – 1985. – Vol. 75. – Issues 1–2. – P. 137–150.
16. *Lin Y. C. Effects of strain on the workability of a high strength low alloy steel in hot compression* / Y. C. Lin, Ge Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 523. – Issues 1–2. – P. 139–144.
17. *Optimization of Hot Workability in Superaustenitic Stainless Steel 654SMO* / En-xiang Pu, Wen-Jie Zheng, Zhi-Gang Song, Jin-Zhong Xiang, Xian-Ping Wei // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2014. – Vol. 21. – Issue 10. – P. 975–982.
18. *Richard K. C. Nkhoma Hot workability of AISI 321 and AISI 304 austenitic stainless steels* / Richard K. C. Nkhoma, Charles W. Siyasiya, Waldo E. Stumpf // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – Vol. 595. – P. 103–112.
19. *El Mehtedi M. Hot workability in process modeling of a bearing steel by using combined constitutive equations and dynamic material model* / M. El Mehtedi, F. Gabrielli, S. Spigarelli // *Materials and Design*. – 2014. – Vol. 53. – P. 398–404.
20. *Wang Xiaofeng Influence of cerium on hot workability of 00Cr25Ni7Mo5N super duplex stainless steel* / Wang Xiaofeng, Chen Weiqing // *Journal of Rare Earths*. – 2010. – Vol. 28. – № 2. – P. 295–300.
21. *Akbarzadeh A. Hot workability of a high carbon high chromium tool steel* / A. Akbarzadeh, S. Naghdy // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 46. – P. 654–659.

Жбанков Я. Г. – канд. техн. наук, докторант каф. ОМД, ДГМА;

Чикота Я. М. – ведущий инженер бюро поковок ОГМет ПАО «НКМЗ»;

Сасов П. А. – студент ДГМА.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

НКМЗ – Новокраматорский машиностроительный завод, г. Краматорск.

E-mail : yzhbankov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.09.2015