

- steel with numerical material testing. International journal for numerical methods in engineering 2012; 89, pp. 829–845. Published online on 12 August 2011 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). doi: 10.1002/nme.3264
36. Wiewiórska S. Określenie parametrów dwustopniowej obróbki cieplnej zapewniających uzyskanie w strukturze końcowej niskowęglowej stali maksymalnej ilości austenitu szczytkowego decydującego o efekcie TRIP. *Hutnik-Wiadomosci-Hutnicze*, 76, 2009, pp. 122-125.
 37. Rauch Ł., Pernach M., Bzowski K., Pietrzyk M. On application of shape coefficients to creation of the statistically similar representative element of DP steels. *Computer Methods in Materials Science*, 11, 2011, pp. 531-541.
 38. Muszka K., Madej Ł., Graca P., Perzynski K., Sun L., Palmiere E. Numerical investigation of influence of the martensite volume fraction on DP steels fracture behavior on the basis of digital material representation model. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, pp. 11-17.
 39. Wei X.C., Li L., Fu R.Y., De Cooman B.C., Wollants P., Zhu X.D., Wang L. Influence of the strain rate on the strain-induced transformation of retained austenite to martensite in high strength low alloy TRIP steels. *Int. Conf. on TRIP-Aided High Strength Ferrous Alloys*, 2002, pp. 367-371.
 40. Wiewiórska S. Determination of content of retained austenite in steels with TRIP effect deformed at different strain rates. *Steel Research International*, 81, 2010, spec. issue conf. Metal Forming, pp. 262-265.
 41. Wiewiórska S. The influence of strain rate and strain intensity on retained austenite content in structure of steel with TRIP Effect. *Solid State Phenomena* 165, 2010, pp. 216-220.
 42. Konstantinov D.V., Korchunov A.G. *Sovremennye podkhody k predstavleniyu mikrostruktury pri modelirovanii protsessov OMD* [Modern approaches to microstructure representation when simulating metal forming processes: international collection of research papers, edited by V.M. Salganik]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014, iss. 20, pp. 49-55.

УДК 669.017.1 + 621.78 : 669.14

К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ 20 В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ *

Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. Исследовано деформационное поведение стали 20 в условиях одноосного изотермического сжатия с использованием комплекса физического моделирования Gleeble 3500 в диапазоне температур 1000–1200°C и скоростей деформации 0,1–1 с⁻¹. На кривых текучести отмечены критические точки и участки, соответствующие основным этапам процесса горячей деформации: динамическое упрочнение, динамический возврат, динамическая рекристаллизация. Проведен сравнительный анализ математических функций, позволяющих описать реологические свойства стали 20. Определены численные значения энергии активации (Q) и параметра Зинера-Холломона (Z). Определены уравнения состояния стали 20.

Ключевые слова: динамическая рекристаллизация, Gleeble 3500, горячая деформация, реологические свойства, параметр Зинера-Холломона, сопротивление деформации.

Введение

В настоящее время моделирование методом конечных элементов (МКЭ) получило большое распространение в качестве математического инструментария для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) в процессах обработки металлов давлением. На сегодняшний день МКЭ реализован в различных программных

комплексах, таких как Symulia Abaqus, Deform2D/3D, QForm, Ansis, Forge 3D и др. [1]. Для корректной постановки задачи, а следовательно, и адекватности получаемых результатов расчетов, в данных программных комплексах, необходимо задать точное описание реологических свойств исследуемого материала [19]. В связи с этим, наличие математической модели, описывающей реологические свойства материала для различных условий деформирования, является актуальной с практической и научной точек зрения задачей.

Условия деформирования оказывают значительное влияние на энергосиловые параметры процесса, микроструктуру и механические свойства готовой продукции. В процессах обработки металлов давлением для оценки напряженно-деформированного состояния, энергосиловых параметров важной характеристикой является сопротивление деформации. На величину сопро-

* Работа выполнена в соответствии с государственным заданием Министерства образования и науки Российской Федерации Магнитогорскому государственному техническому университету им. Г. И. Носова по теме «Разработка технологии получения высокопрочных длинномерных профилей из материалов с ультрамелкозернистой структурой в условиях комбинирования процессов интенсивного пластического деформирования» (Задание № 11.1525K от 18 июля 2014 г.).

Работа проведена в рамках реализации комплексного проекта при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по созданию высокотехнологичного производства, выполняемого с участием российского высшего учебного заведения (Договор 02.G25.31.0105).

тивления деформации оказывают влияние различные факторы, такие как химический состав деформируемого металла, температура, скорость, степень деформации, условия контакта на границе обрабатываемый металл – инструмент и др. Наиболее существенно комплексное влияние перечисленных факторов проявляется в процессах горячей пластической деформации.

Существует множество математических моделей [1–17], отражающих зависимость сопротивления деформации металлов от условий деформирования в горячем состоянии. Данные модели включают в себя физические закономерности деформационного поведения металлов, основанные на элементах теории термодинамики, кинетики движения и скольжения дислокаций. В отличие от данных, получаемых в результате единичных испытаний при простых схемах нагружения (одноосное растяжение, сжатие, кручение и т.д.), такие модели позволяют получить описание реологических свойств металла в большом диапазоне условий деформирования. При этом, математические модели получают на основании экспериментальных данных путем построения кривых (диаграмм) текучести, типичный вид которых представлен на рис. 1. На этом рисунке отражены основные этапы процесса горячей деформации металла и основные критические точки.

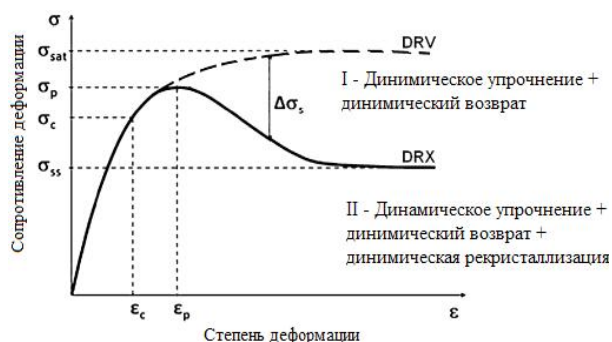


Рис.1. Схематическое изображение кривой текучести в процессе горячей деформации с условным изображением 2 возможных вариантов разупрочнения

При выводе математических моделей сопротивления деформации исследователи используют различные методики расчета. В работах [1–7] применяется метод описания реологических свойств металла при помощи параметра Зинера-Холломона. В этом случае падение сопротивления деформации $\Delta\sigma_s$ при протекании процесса динамической рекристаллизации рассчитывается на основании определения доли динамической рекристаллизации (доли рекристаллизованной структуры). В работах [8–12] изменение реологических свойств металла описывают в зависимости от степени деформации. В данных работах получены

степенные уравнения, связывающие значения констант материала со степенью деформации. В работе [13] реологические свойства стали определяются при помощи описания кривой текучести полиномиальной зависимостью и выражения основных точек (ϵ_p, σ_p) диаграммы текучести через параметр Зинера-Холломона. В этой же работе реологические свойства описываются при помощи нейронной сети. В работах [14–17] процесс деформационного упрочнения описан с точки зрения изменения плотности дислокаций.

Во всех работах, указанных выше, уравнения состояния вида $\sigma = f(T, \dot{\epsilon}, \epsilon)$ представляют собой функцию гиперболического синуса, однако не приводятся обоснования для использования данной функции и ее преимущества по сравнению с другими зависимостями.

В этой связи, целью представляемого далее исследования является сравнительный анализ математических зависимостей, позволяющих рассчитать значение сопротивления деформации для описания реологических свойств низкоуглеродистой стали 20 в процессах горячей пластической деформации.

За последнее десятилетие в ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» активно развивается исследовательская материально-техническая база, активно работают общепризнанные и вновь созданные научные школы под руководством ведущих специалистов в области металлургии. Подтверждением значимости проводимых в университете работ является участие специалистов МГТУ в различных проектах при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации и сотрудничество с крупнейшими предприятиями металлургической отрасли [19–28].

Методика проведения эксперимента

Горячая деформация сжатием осуществлялась на комплексе физического моделирования GLEEBLE 3500. Использовались цилиндрические образцы диаметром 10 мм и длиной 80 мм из стали 20. Образцы были установлены в медные захваты. Нагрев реализовывался прямым пропусканием электрического тока, контроль температуры осуществлялся при помощи термопары, приваренной к поверхности образца. Процесс изотермической горячей деформации с одноосным сжатием осуществлялся при температурах 1200, 1100, 1000°C, с истинной логарифмической степенью деформации $\epsilon=0,8$ и скоростях деформации 0,1, 0,5, 1 с⁻¹. Перед деформированием образец нагревался до температуры 1200°C со скоростью 5°C/с и выдерживался при ней в течение 5 мин для проведения полной аустенизации. Степень деформации опре-

делялась контактным способом при помощи датчика поперечной деформации CGuage [18].

Методика математического расчета значений сопротивления деформации

Построение экспериментальных кривых текучести

На рис. 2 представлены графики зависимости сопротивления деформации от степени деформации, полученные на основании экспериментов. Вид кривых текучести наглядно показывает эффект разупрочнения, выраженный в виде падения сопротивления деформации после достижения пикового значения. При этом разупрочнение является результатом протекания процессов динамического возврата и рекристаллизации.

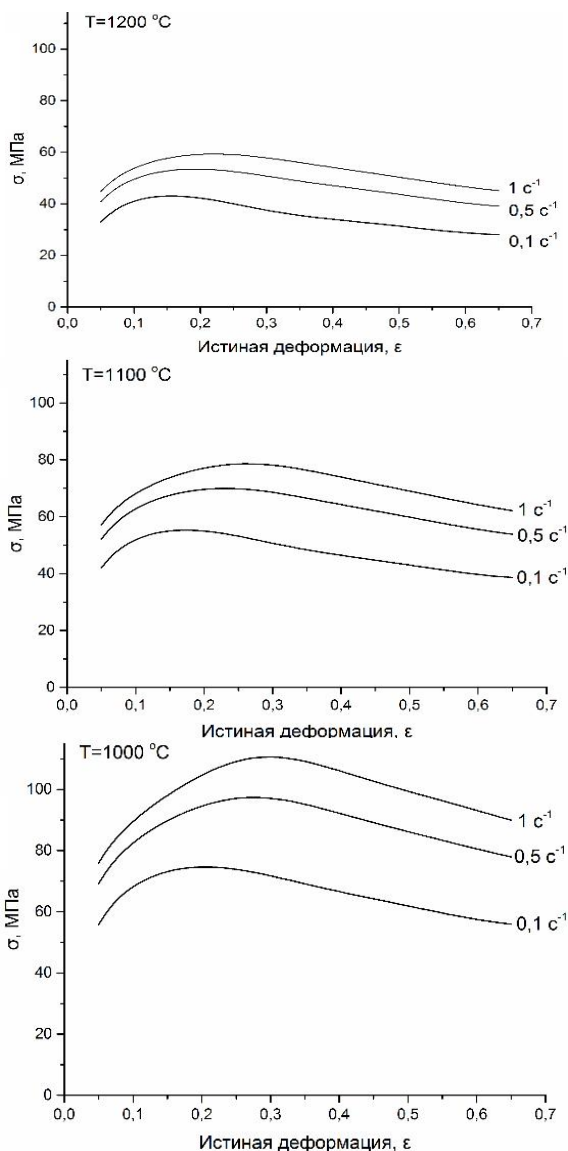


Рис. 2. Экспериментальная зависимость сопротивления деформации стали 20 при различных температурно-скоростных режимах одноосного сжатия

Нахождение параметров модели горячей деформации на основании экспериментальных данных

Реологические свойства металла могут быть описаны с использованием параметра Зинера-Холломона (Z). Он позволяет, на основании термо-кинетической теории, с использованием уравнения Аррениуса, численно установить взаимосвязь сопротивления деформации с температурой и скоростью деформации [1].

Параметр Z может иметь следующие математические выражения:

$$F(\sigma) = \sigma^{n'} \text{ для } \alpha\sigma < 0.8; \tag{1}$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \text{ для } \alpha\sigma > 1.2; \tag{2}$$

$$F(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \text{ для всех } \sigma; \tag{3}$$

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = AF(\sigma); \tag{4}$$

$$\dot{\epsilon} = AF(\sigma) \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \tag{5}$$

где R – универсальная газовая константа (8,31 Дж/моль·К); T – абсолютная температура (К); Q – энергия активации (кДж/моль); $A, A', A'', \alpha, \beta, n, n'$ – коэффициенты материала; $\alpha = \beta / n'$.

Таким образом, функция изменения сопротивления деформации может быть записана в трех различных вариантах (1)–(3): 1 – степенная функция, 2 – экспоненциальная функция, 3 – функция гиперболического синуса.

Для определения коэффициентов материала запишем (5) с учетом (1)–(3) в следующем виде:

$$\dot{\epsilon} = B\sigma^{n'}; \tag{6}$$

$$\dot{\epsilon} = C \exp(\beta\sigma); \tag{7}$$

$$\dot{\epsilon} = D \sinh(\alpha\sigma)^n, \tag{8}$$

где B, C, D – коэффициенты материала, зависящие от температуры.

Используя экспериментальные кривые текучести (см. рис. 2), выбрав значение степени деформации, взяв натуральный логарифм обеих частей (6)–(8) и продифференцировав их, можно построить графики зависимости $\ln(\dot{\epsilon})$ от $\ln(\sigma)$, σ , $\ln(\sinh(\alpha\sigma))$ для разных температур (рис. 3). При построении данных графиков значения сопротивления деформации выбиралась для степени деформации $\epsilon = 0,1$. Коэффициенты материала η', β, η определяются как среднее значение углов наклона кривых соответственно (см. рис. 3):

$$n' = \left[\frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln \sigma} \right]_T; \quad (9)$$

$$\beta = \left[\frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \sigma} \right]_T; \quad (10)$$

$$n = \left[\frac{d \ln \dot{\epsilon}}{d \ln (\sinh (\alpha \sigma))} \right]_T. \quad (11)$$

Полученные линейной аппроксимацией значения коэффициентов η', β, η составили 8,28, 0,14 и 6,19 МПа⁻¹ соответственно. Значение α определяется как $\alpha = \beta / n' = 0,01$.

Из анализа кривых на рис. 3 можно установить, что точки, соответствующие различным скоростям деформации при одинаковой температуре, лежат на одной прямой, а прямые, соответствующие различным температурам, параллельны между собой. Таким образом, можно сделать вывод, что значения рассчитанных выше коэффициентов не зависят от температуры и скорости деформации.

Для определения значения энергии активации Q запишем (5) в следующем виде:

$$\dot{\epsilon} = A' \sigma^{n'} \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right); \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon} = A'' \exp (\beta \sigma) \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right); \quad (13)$$

$$\dot{\epsilon} = A \left[\sinh (\alpha \sigma) \right]^n \exp \left(-\frac{Q}{RT} \right). \quad (14)$$

Взяв натуральный логарифм обеих частей (12)–(14) и продифференцировав их для $\dot{\epsilon} = const$, получим

$$Q = Rn' \left[\frac{d (\ln [\sigma])}{d (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}; \quad (15)$$

$$Q = R\beta \left[\frac{d (\sigma)}{d (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}; \quad (16)$$

$$Q = Rn \left[\frac{d \{ \ln [\sinh (\alpha \sigma)] \}}{d (1/T)} \right]_{\dot{\epsilon}}. \quad (17)$$

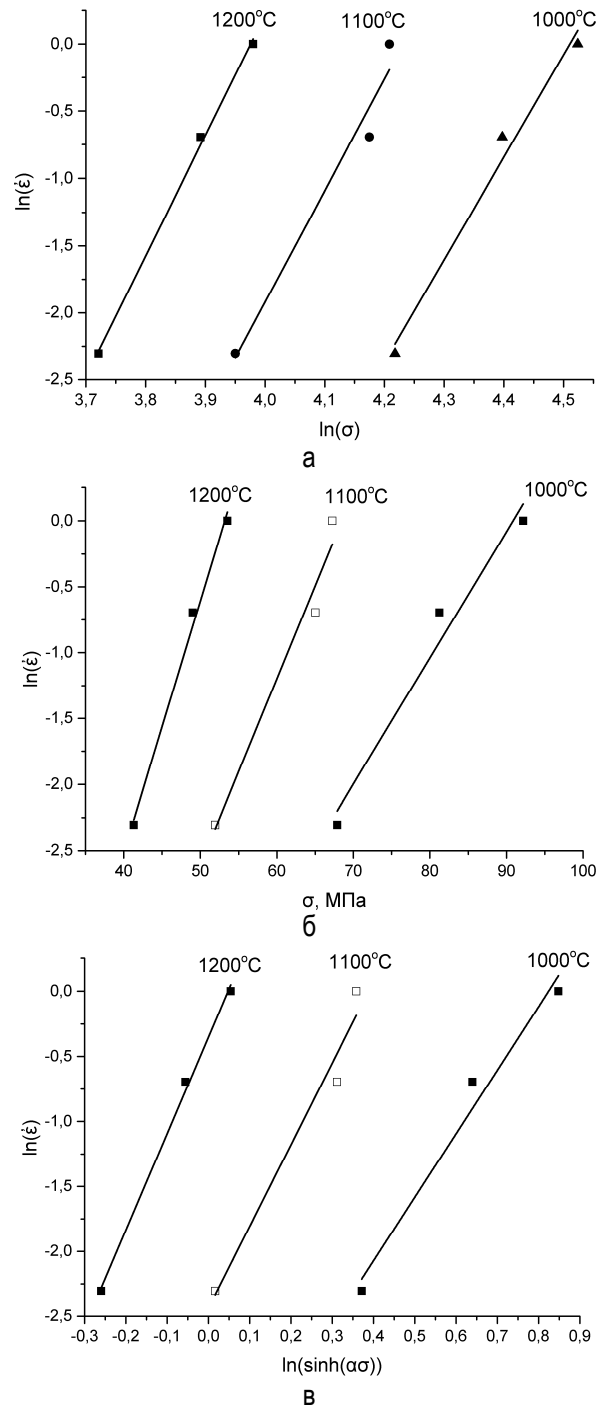


Рис. 3. Определение коэффициентов $\eta'(a), \beta(b), \eta(v)$

На рис. 4 представлены группы кривых, отображающих зависимость $\ln(\sigma), \sigma, \ln(\sinh(\alpha\sigma))$ от $1/T$ ($T=1000, 1100, 1200^\circ\text{C}$) при различных скоростях деформации. Значение Q может быть определено как среднее значение тангенсов углов наклона этих графиков. Численные значения энергии активации Q , рассчитанные по (15)–(17) составляют 332, 361, 341 кДж/моль соответственно.

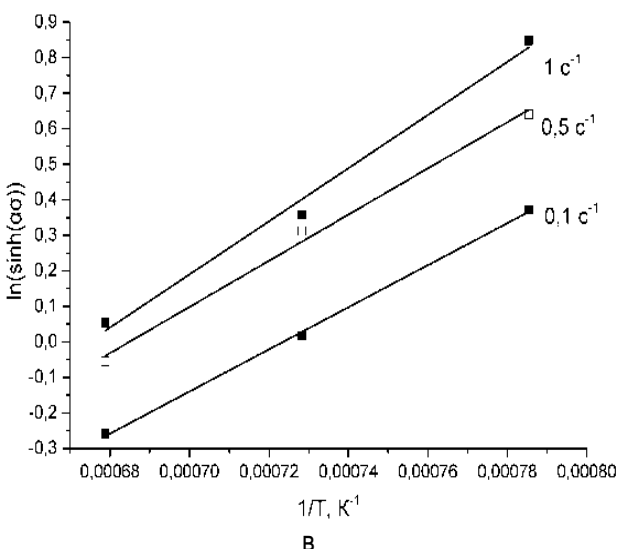
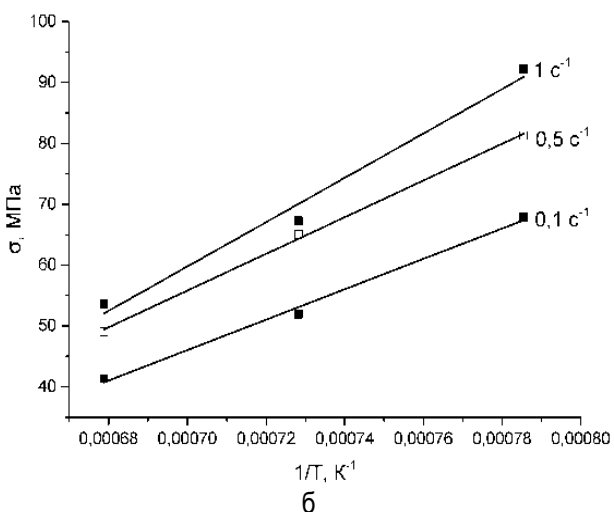
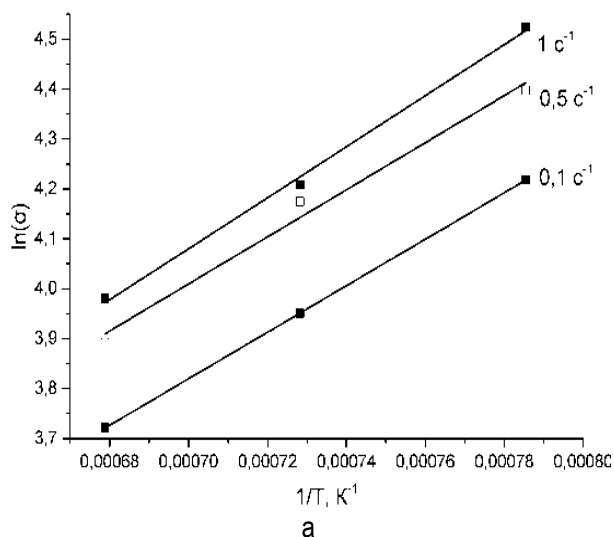


Рис. 4. Определение значения энергии активации Q:
 а – степенная зависимость;
 б – экспоненциальная зависимость;
 в – функция гиперболического синуса

Таблица 1
Значения параметра Зинера-Холломона (Z)
в соответствии с (4)

T, °C	ε̇, c⁻¹	Z		
		Степенная функция (1)	Экспоненциальная функция (2)	Функция гиперболического синуса (3)
1200	0.1	6,26E+10	6,68E+11	1,30E+11
	0.5	3,13E+11	3,34E+12	6,50E+11
	1	6,26E+11	6,68E+12	1,30E+12
1100	0.1	4,53E+11	5,74E+12	9,91E+11
	0.5	2,26E+12	2,87E+13	4,95E+12
	1	4,53E+12	5,74E+13	9,91E+12
1000	0.1	4,47E+12	6,91E+13	1,04E+13
	0.5	2,23E+13	3,46E+14	5,20E+13
	1	4,47E+13	6,91E+14	1,04E+14

Для определения численного значения параметра Зинера-Холломона при заданных скоростях и температурах деформирования, с учетом уравнений (1)–(5), запишем следующее:

$$Z = A' \sigma^{n'}; \tag{18}$$

$$Z = A'' \exp(\beta \sigma); \tag{19}$$

$$Z = A \sinh(\alpha \sigma)^n. \tag{20}$$

Численные значения параметра Z, рассчитанные в соответствии с (18)–(20), представлены в табл. 1.

Взяв натуральный логарифм обеих частей (18)–(20), получим

$$\ln(Z) = \ln(A') + n' \ln(\sigma); \tag{21}$$

$$\ln(Z) = \ln(A'') + \beta \sigma; \tag{22}$$

$$\ln(Z) = \ln(A) + n \ln(\sinh(\alpha \sigma)). \tag{23}$$

Используя данные табл. 1 и экспериментальных кривых текучести (см. рис. 2), можно построить зависимость ln(Z) от ln(σ), σ, ln(sinh(ασ)) (рис. 5). Значения ln(A'), ln(A''), ln(A) в (21)–(23) определяются на основании линейной аппроксимации графиков на рис. 5 и численно равны -5,82, 22,11, 27,48 соответственно.

После того как все константы материала определены, значение сопротивления деформации может быть рассчитано в соответствии с (4) как

$$\sigma = \left(\frac{Z}{A'} \right)^{1/n'} = \left(\frac{\dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{332707,49}{RT}\right)}{e^{-5,82}} \right)^{1/8,28}; \tag{24}$$

$$\sigma = \frac{\ln(Z) - \ln(A)}{\beta} = \frac{\ln\left(\dot{\epsilon} \cdot \exp\left(\frac{361704,13}{RT}\right)\right) - 22,11}{0,14}; \tag{25}$$

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} = \frac{1}{0,01} \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\epsilon} * \exp \left(\frac{341643,99}{RT} \right)}{e^{27,48}} \right)^{1/6,19} \quad (26)$$

Значения сопротивления деформации, полу-

ченные экспериментальным путем, по (24)–(26) и их сравнение представлены в табл. 2, а графическая интерпритация – на рис. 6.

Если точки на рис.6 лежат на одной прямой, то это свидетельствует о высокой сходимости экспериментальных и расчетных данных. Таким образом, можно сделать вывод, что использование степенной функции ((1), рис. 6, а) и функции гиперболического синуса ((3), рис. 6, в) позволяют получить наиболее достоверные результаты.

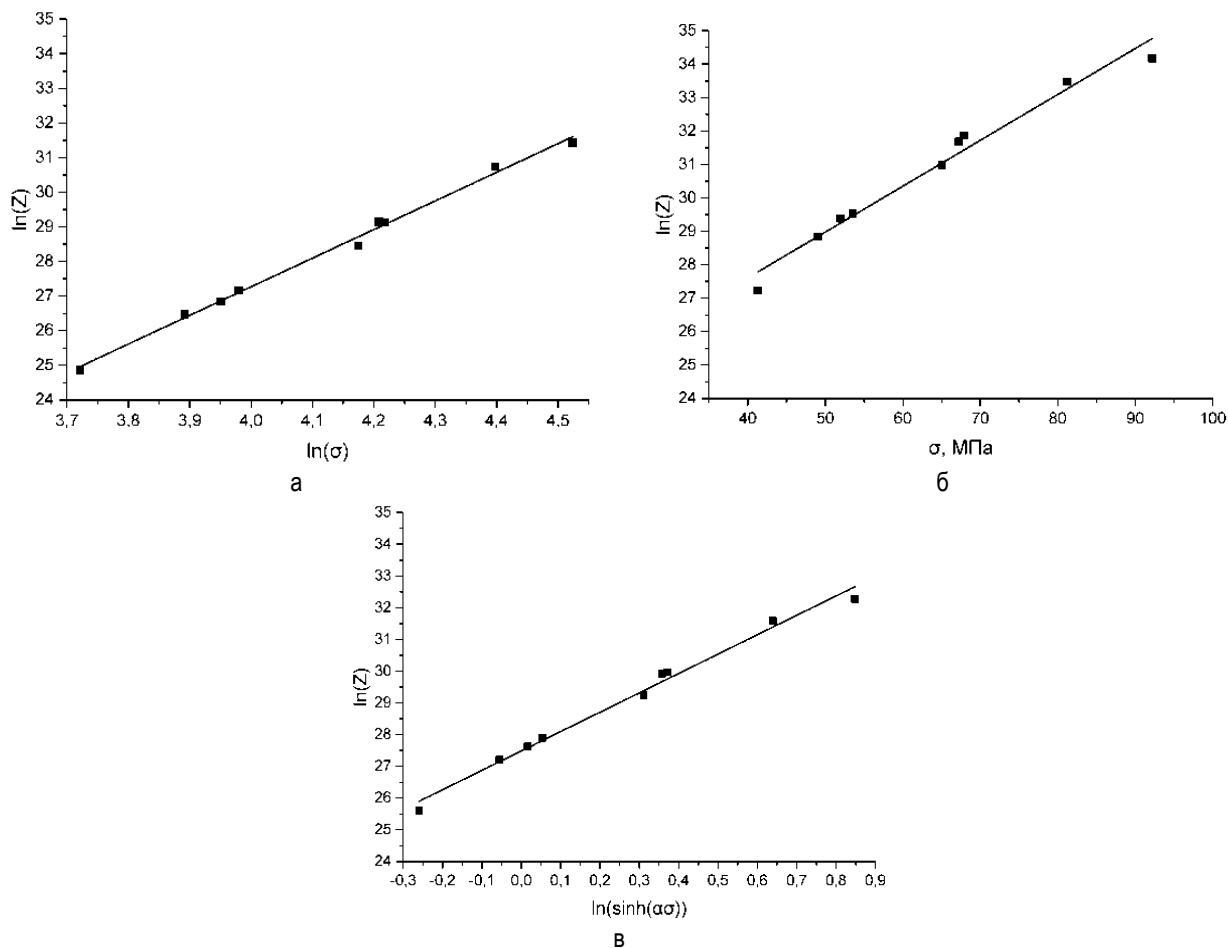


Рис. 5. Определение коэффициентов A'(а), A''(б), A(в)

Таблица 2

Расчитанные значения сопротивления деформации

Экспериментальное значение сопротивления деформации σ_e	Степенная функция (1)	% ошибки	Экспоненциальная функция (2)	% ошибки	Функция гиперболического синуса (3)	% ошибки
41,31	40,48	2,01	35,88	13,14	42,83	3,69
49,01	49,15	0,29	47,18	3,74	54,87	11,96
53,52	53,44	0,14	52,04	2,76	59,91	11,94
51,95	51,39	1,07	50,98	1,87	58,02	11,69
65,03	62,40	4,04	62,27	4,24	67,23	3,39
67,24	67,85	0,90	67,14	0,16	69,98	4,06
67,88	67,73	0,21	68,44	0,83	70,15	3,34
81,23	82,25	1,26	79,74	1,84	74,93	7,75
92,18	89,42	2,99	84,60	8,22	76,59	16,91

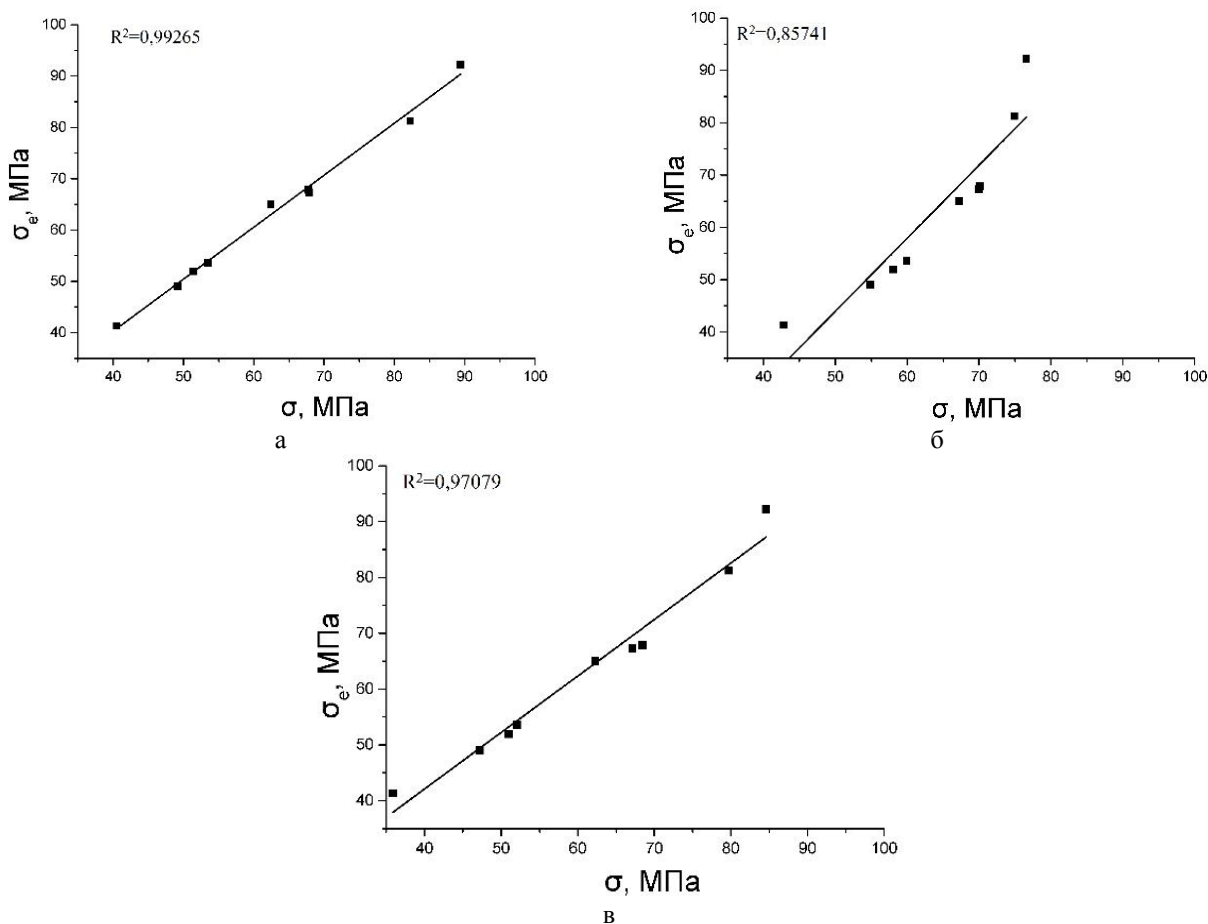


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и рассчитанных значений сопротивления деформации в соответствии с уравнением (1): а – степенная зависимость; б – экспоненциальная зависимость; в – функция гиперболического синуса

Как было указано выше, при расчетах была выбрана степень деформации $\epsilon=0,1$. Данная степень деформации выбиралась произвольно, в качестве примера. Используя данную методику и выбирая последовательно другие степени деформации, во всем диапазоне, для которого построены кривые текучести, можно построить полную модель реологических свойств стали 20.

Заключение и выводы

Исследован характер деформационного течения стали 20 при одноосном сжатии на комплексе физического моделирования Gleeble 3500 и диапазоне температур 1000–1200°C, скоростей деформации 0,1–1 с⁻¹. Сделаны следующие выводы:

1. Получены экспериментальные кривые текучести стали 20 при различных условиях деформирования. На кривых текучести можно отметить критические точки и участки, соответствующие основным этапам процесса горячей деформации: динамическое упрочнение, динамический возврат, динамическая рекристаллизация.

2. Получены численные значения коэффициентов для расчета параметра Зинера-Холломона (Z). Установлено, что коэффициенты уравнений состояния не зависят от условий деформирования. С использованием Z формализованы уравнения состояния для стали 20, устанавливающие связь сопротивления деформации с температурой, скоростью, степенью деформации.

3. На основании сравнения численных значений сопротивления деформации, рассчитанных по полученным уравнениям состояния, с экспериментальными значениями установлено, что наиболее адекватным является использование в уравнениях состояния степенной функции и функции гиперболического синуса.

Представленная методика позволяет на основании небольшого количества экспериментальных исследований получить уравнения состояния материалов при деформировании в заданном температурно-скоростном диапазоне, что позволяет значительно сократить количество экспериментов, проводимых, в том числе, и на промышленном

оборудовании. Полученные уравнения состояния могут быть использованы для расчета напряженно-деформированного состояния, энергосиловых параметров, технологических режимов обработки не только в прикладных программных комплексах, но и в промышленных системах автоматизации.

Список литературы

- Flow curve analysis of 17-4PH stainless steel under hot compression test / Hamed Mirzadeh, Abbas Najafizadeh, Mohammad Moazeny // The minerals, metals & materials society and ASM international. 2009. Vol. 40A. P. 2950–2985.
- Dynamic recrystallization behavior and hot deformation characteristics in 4340 steel / S. V. Sajadifar, M. Ketabchi, B. Bemanizadeh // Metallurgist. 2012. Vol. 56. P. 310–320.
- Hot deformation behavior and flow stress model of F40MNV steel / Wang Jin, Chen Jun, Zhao Zhen, Ruan Xue-Yu. // J. Cent. South Univ. Technol. 2007. P. 19–23.
- Prediction of dynamic recrystallization kinetics and grain size for 410 martensitic stainless steel during hot deformation / A. Momeni And K. Dehghani // Met. Mater. Int. 2010. Vol. 16. No. 5. P. 843–849.
- Investigation of dynamic and static recrystallization behavior during thermomechanical processing in a API-X70 micro alloyed steel / Bahmanmir Zakhani, Mohammad Taghisalehi, Shahink Hoddam, Seyedhosein Seyedein, Mohammad Reza Aboutalebi // Journal Of Materials Engineering And Performance. 2009. Vol. 18(8). P. 1029–1034.
- Hot deformation behaviors and flow stress model OFGCr15 bearing steel / Liao Shu-Lun, Zhang Li-Wen, Yue Chong-Xiang, Pei Ji-Bin, Gao Hui-Ju. // J. Cent. South Univ. Technol. 2008. No. 15. P. 575–580.
- Dynamic recrystallization during hot deformation of 304 austenitic stainless steel / A. Marchattiar, A. Sarkar, J.K. Chakravarty, and B.P. Kashyap // Journal Of Materials Engineering And Performance. 2013. Vol. 22(8). P. 2168–2175.
- Modeling flow stress of 70Cr3MO steel used for back-up roll during hot deformation considering strain compensation / Renfa-Cai, Chenjun // Journal Of Iron and Steel Research. 2013. No. 20 (11). P. 118–124.
- Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression / De-Ningzou, Kun Wu, Ying Han, Wei Zhang, Bao Cheng, Guan-Jun Qiao // Materials and design. 2013. Vol. 51. P. 975–982.
- Constitutive modeling for flow behavior of GCr15 steel under hot compression experiments / Fei Yin, Lin Hua, Huajie Mao, Xinghui Han // Materials And Design. 2013. Vol. 43. P. 393–401.
- The flow behavior and constitutive equation in isothermal compression of FGh4096-Gh4133B dual alloy / Yanhui Liu, Zekun Yao, Yongquanning, Yang Nan, Hongzhenguo, Chun Qin, Zhifeng Shi. // Materials And Design. 2014. Vol. 63. P. 829–837.
- Hot deformation behavior and flow stress modeling of annealed AZ61 Mg alloys/ Chinghao Liao, Homgyu Wu, Chengtao Wu, Fengjun Zhu, Shyong Lee. // Progress In Natural Science: Materials International. 2014. Vol. 24. P. 253–265.
- Modeling and prediction of hot deformation flow curves / Hamed Mirzadeh, Jose Maria Cabrera, And Abbas Najafizadeh // The Minerals, Metals & Materials Society And ASM International. 2012. Vol. 43a. P. 108–122.
- Modeling the flow curve of AISI 410martensitic stainless steel / A. Momeni, K. Dehghani, M. Heidari, And M. Vaseghi // Journal Of Materials Engineering And Performance. 2012. Vol. 21(11). P. 2238–2242.
- Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade / Eli Salpuchi-Cabrera, Jean-Dominique Guerin, Mirentxudu- bar, Mariana H. Staia,Jacky Lesage, Didier Chicot // Materials and design. 2014. Vol. 62. P. 255–264.
- Constitutive modeling for flow stress of 55SiMnMo bainite steel at hot-working conditions / Tao Yan, Enlin Yu, Yuqian Zhao. // Materials and design. 2013. Vol. 50. P. 574–580.
- Физическое и математическое моделирование горячей деформации стали 20Х13/ А.М. Ахмедьянов, С.В. Рушиц, М.А. Смирнов // Вест. Юж.-Урал. гос. ун-та. Сер. «Металлургия». 2013. Вып. 13. № 2. С. 116–124.
- Ишимов А.С., Жеребцов М.С., Чукин Д.М. Моделирование процессов с большими степенями накопленной деформации на исследовательском комплексе Gleeble3500 // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71-й межрегиональной научно-технической конференции / под ред. В.М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Т.1. С. 251–254.
- Барышников М.П., Чукин М.В., Бойко А.Б. Анализ программных комплексов для расчета напряженно-деформированного состояния композиционных материалов в процессах обработки давлением // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4. С. 72–74.
- Производство высокопрочной стальной арматуры для железобетонных шпал нового поколения / под общ. ред. М.В. Чукина. М.: Metallurgizdat, 2014. 276 с.
- Колокольцев В.М. Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. История. Развитие // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 5–6.
- Научная деятельность ГОУ ВПО «МГТУ» в условиях развития нанотехнологий / Чукин М.В., Колокольцев В.М., Гун Г.С., Салганик В.М., Платов С.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №2. С. 55–59.
- Колокольцев В.М. Пять лет от аттестации до аттестации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 5–11.
- Гун Г.С. Инновационные методы и решения в процессах обработки материалов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №4. С. 99–113.
- Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing / Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. 2013. №5. С. 33–35.
- Научно-педагогическая школа магнитогорского государственного технического университета по управлению качеством продукции и производственных процессов / Гун Г.С., Мезин И.Ю., Корчунов А.Г., Чукин М.В., Гун И.Г., Рубин Г.Ш. // Качество в обработке материалов. 2014. №1. С. 5–9.
- Особенности реологических свойств конструкционных наносталей / Чукин М.В., Гун Г.С., Барышников М.П., Валиев Р.З., Рааб Г.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. №1. С. 24–27.
- Исследование формирования субмикроструктурной структуры поверхностного слоя стальной проволоки с целью повышения уровня ее механических свойств / Гун Г.С., Чукин М.В., Емалева Д.Г., Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Барышников М.П. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №4. С. 89–93.

ON THE SELECTION OF A MATHEMATICAL FUNCTION OF THE EQUATION OF STATE FOR A DESCRIPTION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL 20 DURING HOT PLASTIC DEFORMATION

Ishimov Alexey Sergeevich – Postgraduate Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: TTSoprano.A@gmail.com.

Baryshnikov Mikhail Pavlovich – Ph.D. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: arcosmag@mail.ru.

Chukin Mikhail Vitalievich – D.Sc. (Eng.), Professor, First Vice-Rector – Vice-Rector for Science and Innovation, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: chukin@magtu.ru.

Abstract. The hot deformation behavior of steel 20 was investigated by conducting the isothermal uniaxial compression test using physical modeling complex Gleeble 3500 within a temperature range of 1000–1200°C and a strain rate range of 0.1–1 s⁻¹. The experimental yield curves shows critical points and sections, corresponding to main stages of a hot deformation process such as dynamic hardening, dynamic recovery, and dynamic recrystallization. A comparative analysis of mathematical functions allowing us to describe rheological properties of steel 20 was conducted. The activation energy (Q) and the Zener-Hollomon parameter (Z) values were determined. The state equations of steel 20 were defined.

Keywords: dynamic recrystallization, Gleeble 3500, hot deformation, rheological properties, Zener-Hollomon parameter, deformation stress.

References

1. Mirzadeh Hamed, Najafzadeh Abbas, Moazeny Mohammad. Flow curve analysis of 17-4PH stainless steel under hot compression test. *The minerals, metals & materials society and ASM international*. 2009, vol. 40A, pp. 2950-2985.
2. Sajadifar S.V., Ketabchi M., Bemanizadeh B. Dynamic recrystallization behavior and hot deformation characteristics in 4340 steel. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, pp. 310-320.
3. Wang Jin, Chen Jun, Zhao Zhen, Ruan Xue-Yu. Hot deformation behavior and flow stress model of F40MNV steel. *J. Cent. South Univ. Technol.* 2007, pp. 19-23.
4. Momeni A. and Dehghani K. Prediction of dynamic recrystallization kinetics and grain size for 410 martensitic stainless steel during hot deformation. *Met. Mater. Int.* 2010, vol. 16, no. 5, pp. 843-849.
5. Zakhani Bahmanmir, Taghisalehi Mohammad, Hoddam Shahink, Seyedein Seyedhosein, Reza Aboutalebi Mohammad. Investigation of dynamic and static recrystallization behavior during thermomechanical processing in an API-X70 micro alloyed steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009, vol. 18(8), pp. 1029-1034.
6. Liao Shu-Lun, Zhang Li-Wen, Yue Chong-Xiang, Pei Ji-Bin, Gao Hui-Ju. Hot deformation behaviors and flow stress model OFGCr15 bearing steel. *J. Cent. South Univ. Technol.* 2008, no. 15, pp. 575-580.
7. Marchattiar A., Sarkar A., Chakravarty J.K., and Kashyap B.P. Dynamic recrystallization during hot deformation of 304 austenitic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013, vol. 22(8), pp. 2168-2175.
8. Chen Jun, Ren Fa-Cai. Modeling flow stress of 70Cr3MO steel used for back-up roll during hot deformation considering strain compensation. *Journal of Iron and Steel Research*. 2013, no. 20 (11), pp. 118-124.
9. De-Ningzou, Kun Wu, Ying Han, Wei Zhang, Bao Cheng, Guan Jun Qiao. Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression. *Materials and design*. 2013, vol. 51, pp. 975-982.
10. Fei Yin, Lin Hua, Huajie Mao, Xinghui Han. Constitutive modeling for flow behavior of GCr15 steel under hot compression experiments. *Materials and Design*. 2013, vol. 43, pp. 393-101.
11. Yanhui Liu, Zekun Yao, Yongquanning, Yang Nan, Hongzhenguo, Chun Qin, Zhifeng Shi. The flow behavior and constitutive equation in isothermal compression of FGh4096-Gh4133B dual alloy. *Materials and Design*. 2014, vol. 63, pp. 829-837.
12. Chinghao Liao, Homgyu Wu, Chengtao Wu, Fengjun Zhu, Shyong Lee. Hot deformation behavior and flow stress modeling of annealed AZ61 Mg alloys. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014, vol. 24, pp. 253-265.
13. Hamed Mirzadeh, Jose Maria Cabrera, and Abbas Najafzadeh. Modeling and prediction of hot deformation flow curves. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. 2012, vol. 43a, pp. 108-122.
14. A. Momeni, K. Dehghani, M. Heidari, and M. Vaseghi. Modeling the flow curve of AISI 410 martensitic stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2012, vol. 21(11), pp. 2238-2242.
15. Eli Salpuchi-Cabrera, Jean-Dominique Guerin, Mirentxudu-bar, Mariana H. Staia, Jacky Lesage, Didier Chicot. Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade. *Materials and design*. 2014, vol. 62, pp. 255-264.
16. Tao Yan, Enlin Yu, Yuqian Zhao. Constitutive modeling for flow stress of 55SiMnMo bainite steel at hot-working conditions. *Materials and design*. 2013, vol. 50, pp. 574-580.
17. Akhmedyanov A.M., Rushchits S.V., Smirnov M.A. Physical and numerical modeling of hot deformation behavior of 20Kh13 steel. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta, seriya "Metallurgiya"* [Bulletin of the Ural State University. Series "Metallurgy"], 2013, issue 13, no.2, pp. 116-124.
18. Ishimov A.S., Zherebtsov M.S., Chukin D.M. Modelirovanie protsessov s bolshimi stepenyami nakoplennoy deformatsii na isledovatel'skom komplekse Gleeble 3500 [Modelling of high strain processes using Gleeble 3500 system]. *Aktualnie problemi sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems of modern science, machines and education: proceedings of the 71st scientific and technical conference, edited by V.M. Kolokoltsev], Magnitogorsk, 2013, vol. 1, pp. 251-254.
19. Baryshnikov M.P., Chukin M.V., Boiko A.B. Analiz programnykh kompleksov dlya rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kompozitsionnykh materialov v protsessakh obrabotki davleniem [Analysis of software complexes for calculation of a stress-strain state of composite materials during deformation processes]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 4, pp. 72-74.
20. Chukin M.V. *Proizvodstvo vysokoprochnoy stalnoy armatury dlya zhelezobetonnnykh shpal novogo pokoleniya* [Production of high-strength steel reinforcement for a new generation of concrete

- sleepers]. Moscow: Metallurgizdat, 2014, 276 p.
21. Kolokoltsev V.M. Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. G.I. Nosova. Istoriya. Razvitiye. [Nosov Magnitogorsk State Technical University. History. Development]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no.1. pp. 5-6.
 22. Chukin M.V., Kolokoltsev V.M., Gun G.S., Salganik V.M., Platov S.I. Nauchnaya deyatelnost' GOU VPO «MGU» v usloviyakh razvitiya nanotekhnologii [Scientific activity of NMSTU in terms of nanotechnology development]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2009, no.2, pp. 55-59.
 23. Kolokoltsev V.M. Pyat let ot attestatsii do attestatsii [Five years from a certification to a certification]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no.1, pp. 5-11.
 24. Gun G.S. Innovatsionnye metody i resheniya v protsessakh obrabotki materialov [Innovative methods and solutions in materials processing]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no.4, pp. 99-113.
 25. Chukin M.V., Korchunov A.G., Gun G.S., Polyakova M.A., Koptseva N.V. Nanodimensional structural part formation in high carbon steel by thermal and deformation processing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no.5, pp. 33-35.
 26. Gun G.S., Mezin I.Yu., Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun I.G., Rubin G.Sh. Nauchno-pedagogicheskaya shkola magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta po upravleniyu kachestvom produktsii i proizvodstvennykh protsessov [Scientific and pedagogical school of NMSTU on quality management of products and processes]. *Kachestvo v obrabotke materialov* [Quality in metal treatment], 2014, no.1, pp. 5-9.
 27. Chukin M.V., Gun G.S., Baryshnikov M.P., Valiev R.Z., Raab G.I. Osobennosti reologicheskikh svoystv konstruktsionnykh nanostaley [Features of rheological properties of structural nanosteels]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no.1, pp. 24-27.
 28. Gun G.S., Chukin M.V., Emaleeva D.G., Koptseva N.V., Efimova Yu.Yu., Baryshnikov M.P. Issledovanie formirovaniya submikrokristallicheskoy struktury poverkhnostnogo sloya stalnoy provoloki s tselyu povysheniya urovnya ee mekhanicheskikh svoystv [Study of the formation of a submicrocrystalline structure of a steel wire surface layer in order to improve its mechanical properties]. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no.4. pp. 89-93.

УДК 621.744

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРЕЖЕНИЯ И ОТСТАВАНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ

Некит В.А., Платов С.И., Курбаков И.А., Голев А.Д.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. Представлен новый метод исследования кинематических параметров прокатки полос. Новизна метода состоит в одновременном измерении опережения и отставания, что позволяет фиксировать наличие скольжения (пробуксовывания) полосы относительно валков. Для характеристики опережения и отставания использовались относительные величины - коэффициенты опережения и отставания. Представлены результаты экспериментального определения опережения и отставания при прокатке свинцовых полос на лабораторном прокатном стане. Определены значения величин пробуксовки полосы относительно валков при использованных режимах прокатки.

Ключевые слова: прокатка, опережение, отставание, скольжение.

Введение

Исследование опережения применяется для определения коэффициента трения при прокатке и является одним из наиболее точных методов исследования трения [1,2]. Известен экспериментальный метод определения опережения, получивший название «кernовый метод». Недостаток метода заключается в том, что относительная величина опережения невелика, составляет несколько процентов, это снижает точность получаемых результатов. Кроме того, для исследования используют отрезки полосы, а при переходных режимах ускорения или торможения возможно скольжение полосы относительно валков [3–5].

Теория и методы исследования

В настоящей работе представлен усовершенствованный метод исследования, который позволяет частично устранить вышеупомянутые недостатки. Суть его состоит в том, что одновременно с опережением измеряется отставание. Совокупность этих методов с учетом кинематики процесса прокатки позволяет определить расчетным путем величину скольжения. По аналогии с методом экспериментального определения опережения, отставание можно определить путем отслеживания меток на полосе перед прокаткой и их следа на валках после прокатки. Метки в этом случае могут быть нанесены путем окрашивания