

Ю. А. Пузино

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ AISI304 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ НА СЖАТИЕ

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

**Аннотация.** Для повышения эффективности технологических режимов производства изделий требуется проведение имитационного моделирования формоизменения металлов в процессе деформирования. Для получения корректных результатов необходимо правильно задать начальные и граничные условия, в том числе механические свойства материалов, которые представляют собой зависимость напряжения от деформации и скорости деформации при поддерживаемой температуре.

При проведении экспериментов выявляют зависимости механических свойств и констант сталей от деформации, скорости, заданной температуры и химического состава. При этом тип испытания, как правило, зависит от технологии процесса, при моделировании которого будет использоваться полученная информация. Можно обозначить четыре основных вида испытаний, используемых при горячей деформации: испытание на сжатие, растяжение, кручение и разрыв. Наиболее простыми для проведения считаются тесты на одноосное сжатие или растяжение. Результатами данных тестов являются кривые «напряжение течения – степень деформации».

В представленной работе описана методика аппроксимации результатов испытаний на одноосное сжатие цилиндрических образцов из стали AISI304 (аналог 08X18H10).

В ходе исследования была описана математическая модель зависимости «напряжение – деформация». Был разработан алгоритм, определяющий необходимые численные коэффициенты для данной модели. В результате были получены уравнения состояния данного материала, которые характеризуют зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформации, скорости деформации (0.15, 0.5, 1.5, 5 и 15 обратных секунд) и температуры (800, 950, 1080 и 1200 градусов Цельсия). Также было проведено сравнение полученной аппроксимации с результатами экспериментов.

**Ключевые слова:** горячая деформация, напряжение, аппроксимация, математическое моделирование, aisi304, сжатие.

УДК: 539.58

Математическое моделирование – неотъемлемая часть развития науки и технологий в области обработки металлов давлением, без него сегодня совершенно невозможно представить освоение ни одного производственного процесса. В настоящее время существуют различные подходы для прогнозирования структуры и механических свойств сталей и сплавов в процессе горячей деформации.

Увеличение количества и качества математических моделей горячей деформации обусловлено резким развитием физического моделирования в последние два десятилетия, ведь его

---

Поступила 09.11.2014

результаты служат как основой для создания, так и для проверки их адекватности и совершенствования существующих [1].

Из стали AISI 304 изготавливают промышленное оборудование в горнодобывающей, химической, криогенной, пищевой, молочной и фармацевтической отраслях промышленности. В процессе производства изделий такого рода эти стали подвергаются горячей обработке. Поэтому важно знать и уметь предсказывать их деформационное поведение в различных температурно-скоростных режимах.

Цель настоящей работы – исследовать процессы горячей деформации стали AISI304 и получить константы, описывающие механические свойства, необходимые для определения оптимальных технологических режимов производства.

**Проведение испытаний.** Для определения механических свойств исследуемой стали были проведены эксперименты на одноосное сжатие цилиндрических образцов в диапазоне температур 800 – 1200 °С при скоростях деформации 0.15, 0.5, 1.5, 5 и 15 сек<sup>-1</sup>. Эксперименты проводились на установке Gleeble 3800 с использованием модуля Hydrowedge II. Образцы имели цилиндрическую форму, диаметр – 10 мм, высота – 15 мм. Погрешность измерения ±0.025 мм. Образцы нагревались до 1200 °С и выдерживались 1 минуту при данной температуре. Далее производилось охлаждение до температуры деформации (со скоростью 5 °С в сек.), деформирование с соответствующей скоростью и охлаждение в воде. Логарифм деформации равен 1.03. В ходе экспериментов размеры заготовок изменились и стали следующими: средний максимальный диаметр – 18 мм, средняя высота – 5 мм. Всего было произведено 34 испытания.

После проведения испытаний и анализа полученных результатов в некоторых из них было обнаружено падение напряжений после достижения ими пиковых значений с последующим выходом на постоянное установившееся значение. Такое поведение свидетельствует о протекании динамической рекристаллизации [2], начинающейся при некоторой критической степени деформации  $\varepsilon_c$  (см. рис. 1).

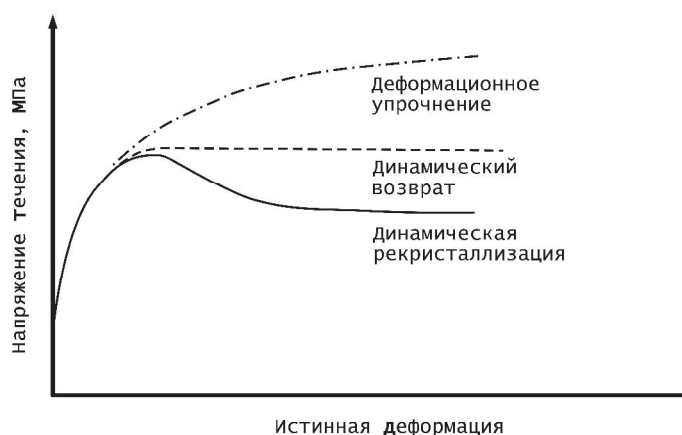


Рис. 1. Различные виды напряжения течения

**Математическая модель.** Зависимость напряжения от деформации, учитывающая динамическую рекристаллизацию, описывается [3] уравнениями:

$$\sigma = \sigma^{drv} - X_D(\sigma^{drv} - \sigma_{ss}^{drx}), \quad (1)$$

$$\sigma^{drv} = \sigma_{ss}^{drv}(1 - \exp[-\Omega\varepsilon])^m, \quad (2)$$

где  $X_D$  – отношение объема рекристаллизованной структуры к начальному объему, которое варьируется от 0 до 1;  $\Omega, m$  – константы материала;  $\varepsilon$  – деформация, а параметры  $\sigma_{ss}^{drv}$ ,  $\sigma_{ss}^{drx}$  – напряжения динамического возврата и динамической рекристаллизации. Соответственно, при  $X_D = 0$  напряжение  $\sigma = \sigma_{ss}^{drv}(1 - \exp[-\Omega\varepsilon])^m$ , а при  $X_D = 1$  получим  $\sigma = \sigma_{ss}^{drx}$ .

Для моделирования поведения динамической рекристаллизации используют следующие соотношения для параметра  $X_D$  [4]:

$$X_D = \begin{cases} 1 - \exp(-a[\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_c}]^n) & \varepsilon > \varepsilon_c \\ 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_c. \end{cases} \quad (3)$$

Соответствующие параметры:  $\varepsilon_c$  – критическая деформация,  $a$  и  $n$  – константы материала. Таким образом, для описания кривой напряжения-деформации необходимо определить 4 неизвестных параметра:  $\Omega, m, a, n$ , которые не зависят от температуры и скорости деформации. При этом критическая деформация  $\varepsilon_c$  описывается так:

$$\varepsilon_c = k \left( \dot{\varepsilon} \exp \left( \frac{Q}{RT} \right) \right)^d, \quad (4)$$

где  $\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации,  $Q, k, d$  – константы материала,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура в Кельвинах.

Зависимости  $\sigma_{ss}^{drv}$ ,  $\sigma_{ss}^{drx}$  от температуры и скорости деформации определяются на основании уравнения [5]:

$$\sigma_{ss}^i = \frac{1}{\alpha_i} \operatorname{arcsinh} \left( A_i \left( \dot{\varepsilon} \exp \left( \frac{Q_i}{RT} \right) \right)^{n_i} \right), \quad (i = drx, drv). \quad (5)$$

Вынесем  $\sigma_{drv}$  в формуле (1) за скобки. Подставляя выражения (3) (с учетом  $\varepsilon > \varepsilon_c$ ) и (2) в выражение (1), получим:

$$\sigma = \sigma_{ss}^{drv} \cdot (1 - \exp[-\Omega\varepsilon])^m \cdot \exp \left( -\alpha \left[ \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right]^n \right) + \sigma_{ss}^{drx} \cdot \left( 1 - \exp \left( -\alpha \left[ \frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_c} \right]^n \right) \right). \quad (6)$$

После подстановки выражений (4) и (5) в (6) получится полная модель зависимости напряжения от деформации, скорости деформации и температуры. Всего же в данной модели необходимо определить 13 неизвестных параметров:  $\Omega, m, a, n, k, d, Q, Q_{drx, drv}, \alpha_{drx, drv}, A_{drx, drv}$ . По экспериментальным зависимостям напряжения от деформации эти параметры были определены методом деформируемого многогранника (он же метод Нелдера-Мида). Для этого был написан скрипт (на языке VBA), обрабатывающий полученные пары напряжение–деформация для конкретных скоростей и температур.

**Алгоритм определения параметров.** Полученные путем экспериментов зависимости напряжений от деформаций при соответствующих температурах и скоростях деформаций были аппроксимированы с учетом уравнений (1–6). Все данные были разбиты на группы по скоростям деформации. Для каждой такой группы процесс аппроксимации проходил в пять этапов:

- (1) вариация 7-и параметров ( $\sigma_{ss}^{drv}, \sigma_{ss}^{drx}, \varepsilon_c, \Omega, m, a, n$ ) для аппроксимации экспериментальных зависимостей (см. рис. 2);
- (2) нахождение 4-х констант для параметров  $X_D$  и  $\sigma^{drv}$  из соотношений (2), (3);
- (3) определение  $Q, k, d$  согласно формуле (4) для критической деформации;
- (4) обобщение найденных параметров;
- (5) вычисление оставшихся 4-х параметров для выражений коэффициентов напряжений  $\sigma_{ss}^{drv}$  и  $\sigma_{ss}^{drx}$  по формуле (5).

Последним пунктом являлось обобщение получившихся аппроксимаций для всех имеющихся экспериментальных данных.

**Численные значения.**

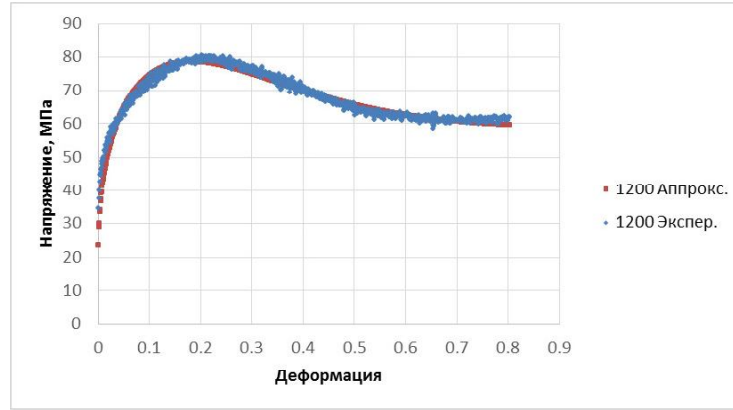


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных при скорости деформации  $0.15 \text{ сек}^{-1}$  и температуре  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$

В результате нахождения аппроксимаций было установлено, что напряжение при одноосном сжатии может быть описано следующими соотношениями с найденными коэффициентами:

$$\sigma^{drv} = \sigma_{ss}^{drv} (1 - \exp[-1.151002\varepsilon])^{0.232577}, \quad (7)$$

$$X_D = 1 - \exp\left(-0.049631 \left[\frac{\dot{\varepsilon} - \varepsilon_c}{\varepsilon_c}\right]^{1.211736}\right), \quad (8)$$

$$\varepsilon_c = 1.187460 \left(\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{3.277031}{RT}\right)\right)^{2.218090}. \quad (9)$$

Параметры для напряжений:

$$\sigma_{ss}^{drv} = 33.968422 \cdot \operatorname{arcsinh}\left(1.11 \cdot 10^{-9} \left(\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{437139.79}{RT}\right)\right)^{0.666757}\right), \quad (10)$$

$$\sigma_{ss}^{drx} = 26.690747 \cdot \operatorname{arcsinh}\left(7.74 \cdot 10^{-11} \left(\dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{177217.14}{RT}\right)\right)^{1.980361}\right). \quad (11)$$

**Сравнение с экспериментальными данными.** Сравнение экспериментальных данных для одноосного сжатия с полученной аппроксимацией изображено на рисунках 3 и 4 для соответствующих скоростей деформаций:  $0.15$  и  $0.5 \text{ сек}^{-1}$  для всех представленных температур.

При обобщении результатов точность аппроксимаций существенно снизилась. Среднее абсолютное отклонение от экспериментальных данных в зависимости от температуры и скорости деформации при данном способе выражения  $\sigma_{ss}^{drv}(\dot{\varepsilon}, T)$  и  $\sigma_{ss}^{drx}(\dot{\varepsilon}, T)$  составляет от  $4.7$  до  $19$  МПа. Например, при скорости деформации, равной  $0.15 \text{ сек}^{-1}$ , интервал отклонений находится в пределах  $4.7 - 10.5$  МПа (см. рис. 3), а при скорости в  $0.5 \text{ сек}^{-1}$  – отклонения в пределах  $11.0 - 18.2$  МПа (см. рис. 4). Максимальное отклонение по всем –  $25$  МПа.

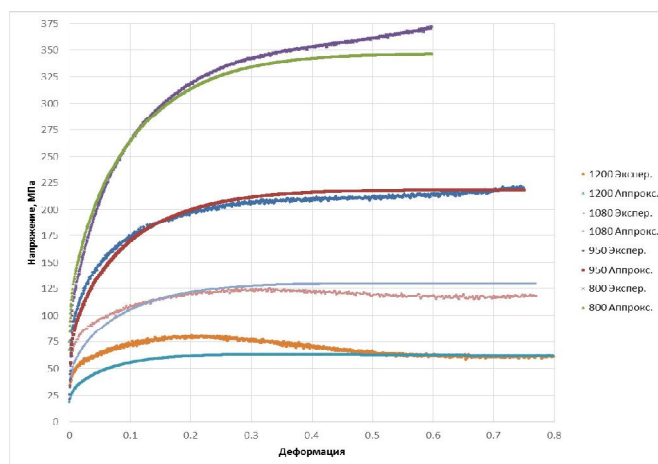


Рис. 3. Аппроксимация экспериментальных данных при скорости деформации  $0.15 \text{ сек}^{-1}$

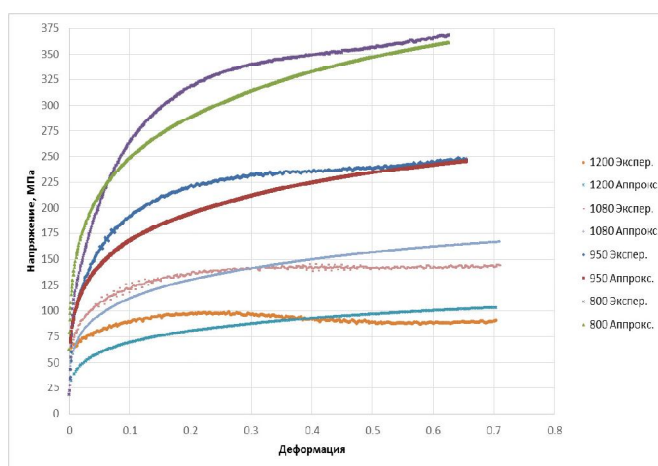


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных данных при скорости деформации  $0.5 \text{ сек}^{-1}$

**Результаты.** В ходе проделанной работы были проведены исследования горячей деформации одноосным сжатием с помощью установки Gleeble для стали AISI304. Построена математическая модель зависимости напряжения от деформации, скорости деформации и температуры с учетом динамической рекристаллизации. Были вычислены константы материала, проведен сравнительный анализ экспериментальных и аппроксимированных данных. Полученные данные упрощают прогнозирование поведения материала при обработке, что является необходимым условием для нахождения оптимальных технологических режимов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чумаченко, Е. Н. Сверхпластичность: материалы, теория, технология / О. М. Смирнов, М. А. Цепин, Е. Н. Чумаченко – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ» – 2009. – 320 с.

[2] *Ахмедьянов, А. М.* Исследование деформационного поведения стали 20x13 в условиях горячей осадки / А. М. Ахмедьянов, С. М. Антонов, С. В. Рушиц // Вестник ЮУрГУ – 2012. – № 39. – С. 89–93.

[3] *Liu, Y.* Experimental Study on Constitutive Equation of AZ31 Magnesium Alloy Plastic Deformation at Elevated Temperature [Электронный ресурс] / Y. Liu, W. Shi // Transactions of „ICPNS’ 2007“ – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – 2007. – Zhengzhou, China.

[4] *Maccagno, T. M.* Spreadsheet modeling of grain size evolution during rod rolling / T. M. Maccagno, J. J. Jonas, P. D. Hodgson // ISIJ International. – 1996. – № 6(36). – С. 720–728.

[5] *Kuziak, R.* Modeling of the microstructure and mechanical properties of steel during thermomechanical processing / R. Kuziak, Y. Chen, M. Glowacki, M. Pietrzyk // NIST Technical note 1393. – 1997 (November). – 80 с.

*Пузино Юрий Алексеевич,*

*аспирант кафедры механики и математического моделирования, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва*

*e-mail: puzino.y.a@gmail.com*

Y. A. Puzino

## THE DETERMINATION OF THE MODEL PARAMETERS DURING HOT DEFORMATION OF AISI304 STEEL BASED ON THE COMPRESSION TESTS RESULTS

*National Research University «Higher School of Economics»*

**Abstract.** The increasing of the efficiency of technological modes of steel products manufacturing requires simulation of metal forming during hot deformation. To obtain correct results, one should set the correct initial and boundary conditions, including the mechanical properties of materials, which represent the dependence of the stress-strain and strain rate at maintained temperature.

In the experiments one must reveal the mechanical properties and constants of the steels according to strain rate, predetermined temperature and chemical composition. So, the type of test is usually depends on the technology process, which simulation will be using the obtained information. One can identify four main types of tests used in the hot deformation: compression, tension, torsion and rupture tests. The simplest tests are considered as uniaxial compression or tension tests. The results of these tests are the curves of «flow stress – strain».

The present study describes an approximation method of test results for uniaxial compression of cylindrical samples made from AISI304 steel.

During this work a mathematical model of the «stress – strain» relation has been described. An algorithm that determines the necessary numerical coefficients for this model was developed. As a result, the equation of the material state, which is characterized by the stress relation on the strain, strain rate (0.15, 0.5, 1.5, 5 and 15 inverse seconds) and temperature (800, 950, 1080 and 1200 degree Celsius) was found. Also the approximation comparison with the experimental results were obtained.

**Keywords:** hot deformation, stress, approximation, mathematical simulation, aisi304, compression.

### REFERENCES

- [1] *Chumachenko, E. N.* Superplasticity: materials, theory, technology / O. M. Smirnov, M. A. Cepin, E. N. Chumachenko – 2-nd edit., extended – M. : «Librokom» – 2009. – 320 p.
- [2] *Ahmedyanov, A. M.* Study of the deformation behavior of 20x13 steel in hot precipitation / A. M. Ahmedyanov, C. M. Antonov, S. V. Rushin // Bulletin of South Ural State University – 2012. – № 39. – P. 89–93.
- [3] *Liu, Y.* Experimental Study on Constitutive Equation of AZ31 Magnesium Alloy Plastic Deformation at Elevated Temperature [Электронный ресурс] / Y. Liu, W. Shi // Transactions of „ICPNS’ 2007“ – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) – 2007. – Zhengzhou, China.
- [4] *Maccagno, T. M.* Spreadsheet modeling of grain size evolution during rod rolling / T. M. Maccagno, J. J. Jonas, P. D. Hodgson // ISIJ International. – 1996. – № 6(36). – P. 720–728.
- [5] *Kuziak, R.* Modeling of the microstructure and mechanical properties of steel during thermomechanical processing / R. Kuziak, Y. Chen, M. Glowacki, M. Pietrzyk // NIST Technical note 1393. – 1997 (November). – 80 p.

*Puzino, Yury Alekseevich*

*Postgraduated student, department of mechanics and mathematical simulation, National Research University «Higher School of Economics», Moscow*