ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 539.374

DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-1-23-30

ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ МАРКИ 32Г2У В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР

Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В.

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Состояние вопроса. Несмотря на важность для проектирования и расчётов процессов обработки металлов давлением такого фактора, как величина сопротивления металла пластической деформации, нахождение необходимой для его расчёта информации может быть затруднительно. И можно назвать две основные причины такому положению дел – существование множества расчётных методик и ещё большего количества марок сталей. Кроме того, как правило, методики расчёта, и опубликованные значения численных коэффициентов, необходимых для расчёта, различны для процессов холодной и горячей деформации. При этом остаётся наименее исследованный диапазон температур – примерно от 300 до 600°C. Данная статья посвящена исследованию сопротивления пластической деформации стали 32Г2У с учетом его функциональных свойств. Выбор данной марки стали обусловлен тем, что она широко применяется при производстве бесшовных труб для нефтегазовой отрасли. Особенностью исследования является то, что оно было проведено по единой методике для диапазона температур от комнатной до температур близких к температуре плавления. Такой широкий диапазон температур позволяет использовать полученные результаты при расчёте всех возможных технологических операции производства труб, как процессы горячей деформации калибровки и правки труб в термических отделах трубопрокатных цехов, формовка прямошовных сварных труб. **Методика исследования.** Для определения численных значений коэффициентов, входящих в уравнение, была проведена серия испытаний на комплексе Gleeble 3800. По полученным кривым сопротивления деформации для диапазона температур от 300 до 1200°C были определены значения коэффициента, характеризующего разупрочнение металла. При этом впервые был обнаружен факт разупрочнения металла при температурах близких к 600°C и дано физическое обоснование этого явления. **Полученные результаты.** Определены причины разупрочнения металла при температуре близкой к 600°C. По результатам испытаний была получена рекуррентная зависимость, позволяющая рассчитывать величину сопротивления деформации с учётом разупрочнения в широком диапазоне температур.

Ключевые слова: разупрочнение; микроструктура, пластическая деформация, сопротивление металла пластической деформации.

© Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В., 2020

Для цитирования

Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В. Исследование сопротивления металла пластической деформации стали марки 32Г2У в широком диапазоне изменения температур // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №1. С. 23–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-23-30>

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

STUDYING PLASTIC RESISTANCE OF STEEL GRADE 32G2U IN A BROAD RANGE OF TEMPERATURE CHANGE

Ahmed S. O. Al-Khuzai, Alexander V. Vydrin, Vyacheslav V. Shirokov

South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia

Abstract. State of the issue. Although it is important to know such factor as a value of plastic resistance of steel, when designing and calculating metal forming processes, it may be challenging to find information relevant for its calculation. Two main reasons may be mentioned: many calculation methods and even greater steel grades. Besides, as a rule, calculation methods and published values of numerical coefficients used in calculations vary for cold and hot forming processes. The least studied range of temperatures is approximately from 300 to 600°C. This paper is devoted to studies on plastic resistance of steel grade 32G2U in view of its functional properties. This steel grade was chosen because it is widely used in manufacturing of seamless pipes for the oil and gas industry. The characteristic feature of the studies is a common methodology used for a temperature range from room temperature to temperatures close to melting temperature. Such broad temperature range contributes to the use of the obtained results, when calculating all possible pipe manufacturing operations, such as hot working, sizing and leveling of pipes in heat treatment divisions of pipe rolling shops, forming of longitudinal welded pipes. **Research methodology.** To determine values of coefficients included in the equation, the authors conducted tests applying Gleeble 3800. Using the generated strain resistance curves for a temperature range of 300 to 1200°C, the authors determined values of the coefficient characterizing steel softening. For the first time, it was found that steel is softened at temperatures close to 600°C and this phenomenon was explained in terms of physics. **Findings.** The authors determined the reasons for steel softening at temperature close to 600°C. The test results showed a recurrent dependence to calculate a value of steel resistance considering softening in a broad range of temperatures.

Keywords: softening, microstructure, plastic deformation, plastic resistance of steel.

For citation

Al-Khuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Studying Plastic Resistance of Steel Grade 32G2U in a Broad Range of Temperature Change. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 23–30. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-23-30>

Введение

Сопротивление металла пластической деформации является важнейшей характеристикой процесса пластического течения, в частности при обработке металлов давлением. От величины сопротивления металлов пластической деформации зависит, прежде всего, уровень энергосиловых параметров процесса и, следовательно, мощность, которую необходимо подвести в очаг деформации.

Величина сопротивления металлов пластической деформации зависит от типа кристаллической решетки металла, его химического состава и структуры, степени и скорости деформации, температуры металла, истории развития деформации во времени [1]. В настоящее время известно довольно много методик расчёта величины сопротивления металла деформации [2,3]. При этом, как правило, методики определения сопротивления металлов пластической деформации для случаев холодного и горячего деформирования различаются между собой. При холодной деформации считается, что сопротивление металла пластической деформации зависит только от степени деформации, и эта зависимость имеет степенной характер. При горячей деформации широкое распространение нашёл метод термомеханических коэффициентов, позволяющий учесть влияние на сопротивление металла пластической деформации степени, скорости и температуры [4]. Как правило, зависимость величины сопротивления деформации определяют

отдельно для случая холодной (20–300°C) и горячей (800–1200°C) деформации [3,5,8,10–12]. Как следствие, известные методики нельзя распространять на случай тепловой деформации (для сталей это диапазон температур от 300 до 800°C) и к тому же они не учитывают влияние истории нагружения.

Достаточно корректная и научно обоснованная методика определения сопротивления металла пластической деформации как функционала, учитывающего историю деформирования, представлена в работе [6]. Однако эта методика приводит к необходимости решения интегрального уравнения, что связано с существенными математическими трудностями. Еще одна попытка конструирования функционала сопротивления металла пластической деформации на основе анализа соотношения скоростей упрочнения и разупрочнения представлена в работе [7]. Но и она привела к необходимости решения интегрального уравнения. Поэтому в работе [7] на основе полученного функционала предложен рекуррентный алгоритм расчета сопротивления металла пластической деформации и методика определения входящих в него реологических коэффициентов. При этом, в частности, для определения скорости разупрочнения металла используется известная формула [13]

$$\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{s0} \exp\left(\frac{(-\Delta t)}{k}\right),$$

где $\Delta\sigma$, – величина остаточного упрочнения через промежуток времени Δt после окончания процесса деформирования; $\Delta\sigma_{s0}$ – величина упрочнения металла в конце процесса деформации; k – эмпирический коэффициент.

Эмпирический коэффициент k характеризует скорость процессов разупрочнения и с физической точки зрения представляет собой промежуток времени, в процессе которого происходит полное разупрочнение металла. В работе [7] показано, что этот коэффициент зависит от температуры. Однако следует отметить, что в настоящее время практически отсутствуют экспериментальные исследования закономерностей интенсивности разупрочнения металла. В настоящей работе сделана попытка устранить этот недостаток.

Методика исследования

Для определения численных значений коэффициента k была проведена серия испытаний на комплексе Gleeble 3800. Данный комплекс в последнее время широко применяется для исследо-

вания процессов деформации [8,9,11,12]. В качестве исследуемого материала использовалась трубная сталь 32Г2У. Данная марка стали широко применяется при производстве бесшовных труб для нефтегазовой промышленности. Для этой стали на основе экспериментальных данных были построены кривые зависимости ее сопротивления деформации от степени деформации в диапазоне температур от 20 до 1200°C. Для определения коэффициента разупрочнения использовали результаты испытаний при температурах от 300 до 1200°C, поскольку при меньших температурах разупрочнение практически не наблюдается. Кривые, описывающие зависимость величины сопротивления деформации от степени деформации для различных температур, представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что с ростом температуры деформации увеличивается величина разупрочнения. Что ожидаемо, однако, из рисунка также видно, что кривые деформации для температуры 600°C отличаются от кривых деформации, полученных как при более высоких температурах, так и при более низких.

Рис. 1. Зависимость величины сопротивления деформации стали 32Г2У от величины деформации при различных температурах

Fig. 1. Variation of plastic resistance of steel grade 32G2U with respect to deformation at various temperatures

Для объяснения этого феномена было проведено исследование трансформации микроструктуры металла, которое показало, что при температуре деформации 300°C происходит только изменение формы зерен без изменения фазового состава. При температурах 900 и 1200°C, как и следовало ожидать, происходит образование аустенита. При этом отсутствие разупрочнения на кривых «деформация-напряжение» при температурах 900 и 1200°C объясняется тем, что фактически в процессе эксперимента замеряется усилие осадки, на которое влияет подпирющее действие сил трения на контактной поверхности. Несмотря на то, что в процессе эксперимента между бойком испытательной машины и деформируемым образцом подкладывались пластинки, служащие для снижения напряжений трения, микроструктурные исследования показали наличие зоны затрудненной деформации вблизи контактной поверхности, что свидетельствует о заметном влиянии сил трения на величину усилия осадки. Проведенные в последующем опыты на растяжение показали, что при температурах 900 и 1200°C происходит динамическое разупрочнение металла, которое не фиксируется при сжатии образцов из-за влияния на результаты замеров напряжений контактного трения.

Исследования микроструктуры металла*, продеформированного при 600°C, показали, что исходная структура представляет собой зерна перлита, окруженные зернами феррита (рис. 2, а). В процессе деформации зерна феррита вытягиваются в направлении течения металла, но при этом практически не происходит изменения их фазового состава. В зернах перлита пластическая деформация приводит к разрушению прослоек цементита, отдельные фрагменты которых благодаря диффузии затем коагулируют

(рис. 2, б). В результате прочностные свойства металла снижаются, несмотря на отсутствие фазовых превращений.

Полученные при проведении экспериментов на сжатие образцов из стали 32Г2У результаты были обработаны для получения коэффициентов, входящих в зависимости для расчета величины сопротивления деформации. Для этого кривые изменения величины сопротивления деформации и степени деформации представлялись в виде зависимости от времени (рис. 3).

Величина коэффициента k определялась с использованием экспериментальных данных по формуле

$$k = \left(\frac{(-\Delta t)}{\ln \frac{\Delta \sigma_s}{\Delta \sigma_{s0}}} \right).$$

Полученные кривые показывают, что во время разупрочнения температура металла остается практически постоянной благодаря системам автоматизации установки Gleeble 3800. Это, в свою очередь, позволило определить зависимость коэффициента k от температуры.

Полученные результаты

Для получения значений эмпирических коэффициентов все экспериментальные данные были обработаны с помощью метода наименьших квадратов. В результате для стали 32Г2У с учетом влияния температуры на процесс разупрочнения было получено

$$\Delta \sigma_s = \Delta \sigma_{s0} \exp \left(\frac{(-\Delta t)}{0.098 \left(\frac{1389 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right).$$

а

Коагулированные частицы цементита
Деформированное зерно феррита

б

Рис. 2. Микроструктура: а – исходная; б – после деформации при 600°C
Fig. 2. Microstructure: a is an original microstructure; б is after deformation at 600°C

* Исследования проведены при научном консультировании профессора М.А. Смирнова.

Рис. 3. Зависимости величины степени деформации (1), сопротивления деформации (2) и температуры (3) от времени
Fig. 3. Relations between deformation degree (1), strain resistance (2), temperature (3) and time σ_{s1}

Для определения влияния деформационной составляющей упрочнения на величину сопротивления металла пластической деформации были проведены эксперименты по растяжению образцов из стали 32Г2У при комнатной температуре. Эксперименты также проводились на комплексе Gleeble 3800. В результате была построена кривая упрочнения для металла, отобранного от гильзы после прошивки. Уравнение, описывающее кривую упрочнения, полученное с применением метода наименьших квадратов, имеет вид

$$\sigma_s = 485 + 747\Lambda^{1.27},$$

где Λ – величина деформации.

Адекватность этого уравнения полученным экспериментальным данным показана на рис. 4.

Рис. 4. Диаграмма соответствия расчетных и экспериментальных данных по определению сопротивления пластической деформации стали марки 32Г2У при комнатной температуре

Fig. 4. Diagram of conformity of the calculated and experimental data to calculate plastic resistance of steel grade 32G2U at room temperature

Чтобы построить рекуррентный алгоритм для определения сопротивления металла пластической деформации по методике работы [7], необходимо также знать влияние температуры на сопротивление металла пластической деформации в исходном состоянии, то есть характер функции $\sigma_{s0} = \Delta\sigma_{s0}(\theta)$. За основу при этом была взята зависимость, общий вид которой представлен в работе [7]. Для определения эмпирических коэффициентов, входящих в эту зависимость, применительно к стали 32Г2У были проведены эксперименты по растяжению образцов при различных температурах на комплексе Gleeble 3800. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 5. Уравнение регрессии, построенное путем обработки полученных экспериментальных данных с помощью метода наименьших квадратов, имеет вид

$$\sigma_{s0} = 485 \exp \left[-0.9591 \left(\frac{\theta - 20}{1389 - \theta} \right) \right]^{0.43},$$

где θ – температура стали перед деформированием.

Рис. 5. Влияние температуры нагрева на сопротивление пластической деформации стали 32Г2У в недеформированном состоянии

Fig. 5. Influence of heating temperature on plastic resistance of steel grade 32G2U in a non-deformed state

В итоге получено базовое уравнение рекуррентного алгоритма определения сопротивления пластической деформации стали марки 32Г2У в виде

$$\sigma_n = 485 \exp \left[-0.9591 \left(\frac{\theta_n - 20}{1389 - \theta_n} \right) \right]^{0.43} \sum_{i=1}^n \left[7474 (\Lambda_i^{1.27} - \Lambda_i^{1.27}) \times \right. \\ \left. \times \left(\sigma_{d(i-1)} - 485 \exp \left[-0.9591 \left(\frac{\theta_{i-1} - 20}{1389 - \theta_{i-1}} \right) \right]^{0.43} \right) \exp \left(\frac{(-\Delta t)}{0.098 \left(\frac{1389 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right) - 1 \right]$$

Заключение

В представленной работе выполнено комплексное исследование процессов упрочнения и разупрочнения стали 32Г2У в диапазоне изменения температуры от 20 до 1200°C. Получено рекуррентное уравнение для расчёта величины сопротивления деформации металла в диапазоне температур от 20 до 1200°C. Определена зависимость для вычисления коэффициента разупрочнения стали. При этом выявлен физический механизм разупрочнения стали при температурах тепловой деформации, который заключается в разрушении и коагуляции частиц цемента в перлитном зерне.

Полученные результаты могут быть использованы при определении технологических параметров процессов холодной прокатки труб, например на станах ХПТ, трубозлектросварочных агрегатах (температура от 20 до 300°C), процессов калибровки и правки труб в термических отделах (температура от 300 до 700°C) и процессов горячей деформации при прошивке и раскатке гильз (температура выше 700°C).

Список литературы

1. Коликов А.П., Романцев Б.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Изд. Дом МИСиС, 2015. 451 с.
2. Остапенко А.Л., Забира Л.А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета // Чёрная металлургия. 2009. №3 (1311). С. 54–79.
3. Хензель А., Шпиттель Т. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд.: пер. с нем. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
4. Зильберг Ю.В. Теория обработки металлов давлением. Днепропетровск: Пороги, 2009. 434 с.
5. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.
6. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. 836 с.
7. Дукмасов, В.Г. Выдрин А.В. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. 215 с.
8. Ишимов А.С., Барышников М.П., Чукин М.В. К вопросу выбора математической функции уравнения со-

- стояния для описания реологических свойств стали 20 в процессе горячей пластической деформации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1 (49). С. 43–52.
9. E.I. POLIAK, J.J. JONAS. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation. *ISI International*, vol. 43 (2003), no. 5, pp. 684–691.
10. New model predicting flow curves in wide range of thermomechanical conditions of 38MnVS6 steel / Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Vančura F., Kawulok R., Ruzs S. // METAL 2016 - International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 25.05-27.05 2016, Brno, Czech Republic, EU. С. 458–463.
11. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe-40Al / Kawulok R., Opěla P., Schindler I., Kawulok P. // METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 15. - 17. 5. 2013, Brno, Czech Republic, EU. С. 444–449.
12. Hot flow stress models of the steel C45 / Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Kawulok R., Ruzs S., Petrek T., Vančura F. // *Metallurgija - Sisak then Zagreb*, т. 54, №3, с. 469–472.
13. Аль-Кхузаи А.С.О., Выдрин А.В., Широков В.В. Анализ возможности применения универсальной феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. 2018. №4 (27). С. 61–69.

Поступила 20.12.2019; принята к публикации 21.01.2020; опубликована 25.03.2020

Аль-Кхузаи Ахмед Салим Олейви – аспирант

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: asaalkhuzai@mail.ru

Выдрин Александр Владимирович – д-р техн. наук, профессор

Южно-Уральский государственный университет

зам. генерального директора по научной работе,

ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности», Челябинск, Россия.

E-mail: vydrinav@susu.ru

Широков Вячеслав Вячеславович – канд. техн. наук, доцент

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: shirokovvv@susu.ru

ORCID 0000-0003-1663-9362

References

1. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: MISiS Publishing House, 2015, 451 p. (In Russ.)
2. Ostapenko A.L., Zabira L.A. Deformation resistance of steels during rolling and the methods of its calculation. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous metallurgy], 2009, no. 3 (1311), pp. 54–79. (In Russ.)
3. Hensel A., Spittel T. *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. Leipzig, 1978.
4. Zilberg Yu.V. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 434 p. (In Russ.)
5. Tretyakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem* [Mechanical properties of metals and alloys during metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 224 p. (In Russ.)
6. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Yekaterinburg: Publishing House of Ural State Technical University – UPI, 2001, 836 p. (In Russ.)
7. Dukmasov V.G., Vydrin A.V. *Matematicheskie modeli i protsessy prokatki profiley vysokogo kachestva* [Mathematical models and processes of rolling of high-quality profiles]. Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2002, 215 p. (In Russ.)
8. Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V. On the issue of choosing the mathematical function of the equation of state to describe rheological properties of steel 20 in the process of hot plastic deformation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 1 (49), pp. 43–52. (In Russ.)
9. E.I. Poliak, J.J. Jonas. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation. *ISI International*, vol. 43 (2003), no. 5, pp. 684–691.
10. Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Vančura F., Kawulok R., Ruzs S. New model predicting flow curves in wide

range of thermomechanical conditions of 38MnVS6 steel. METAL 2016 - International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 25.05-27.05.2016, Brno, Czech Republic, EU, pp. 458–463.

11. Kawulok R., Opěla P., Schindler I., Kawulok P. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe-40Al. METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings 15. - 17.5.2013, Brno, Czech Republic, EU, pp. 444–449.
12. Opěla P., Schindler I., Kawulok P., Kawulok R., Ruzs S., Petrek T., Vančura F. Hot flow stress models of the steel C45. Metalurgija -Sisak then Zagreb, vol. 54, no.3, pp. 469–472.
13. Al-Khuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V. Analysis of a possible application of a universal phenomenological model of metal resistance to plastic deformation] *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniyem* [Modeling and development of metal forming processes], 2018, no. 4 (27), pp. 61–69. (In Russ.)

Submitted 20/12/2020; revised 21/01/2020; published 25/03/2020

Ahmed S. O. Al-Khuzai – Postgraduate Student

South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia. E-mail: asaalkhuzai@mail.ru

Alexander V. Vydrin – DrSc (Eng.), Professor

South Ural State University, Deputy General Director for Research

OJSC Russian Research Institute of the Pipe Industry (RosNITI), Chelyabinsk, Russia. E-mail: vydrinav@susu.ru

Vyacheslav V. Shirokov – PhD (Eng.), Associate Professor

South Ural State University (SUSU), Chelyabinsk, Russia.

E-mail: shirokovvv@susu.ru. ORCID 0000-0003-1663-9362