

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ МАРКИ 32ХГА

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

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Несмотря на важность для проектирования и расчётов процессов обработки металлов давлением такого фактора, как величина сопротивления металла пластической деформации, на сегодняшний день существует множество методик, результаты расчёта по которым могут значительно отличаться друг от друга. Также далеко не для всех марок сталей определены и опубликованы значения эмпирических коэффициентов, используемых для расчёта. При этом методики расчёта и опубликованные значения численных коэффициентов различны для процессов холодной и горячей деформации. А диапазон температур примерно от 300 до 600 °С остаётся наименее исследованным. Данная статья посвящена исследованию сопротивления пластической деформации стали 32ХГА с учетом его функциональных свойств и продолжает серию статей по результатам проведённых авторами исследований. Выбор данной марки стали обусловлен тем, что она широко применяется при производстве бесшовных труб для нефтегазовой отрасли. Данное исследование было проведено по единой методике для диапазона температур от комнатной до близких к температуре плавления, что позволяет использовать полученные результаты при расчёте всех возможных технологических операций производства труб, включая правку труб в термических отделах трубопрокатных цехов, и формовку прямошовных сварных труб.

Для определения численных значений коэффициентов, характеризующих рассматриваемую марку стали, была проведена серия испытаний на комплексе Gleeble 3800. По полученным кривым сопротивления деформации для диапазона температур от 300 до 1200 °С были определены значения коэффициента, характеризующего разупрочнение металла. 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.

От величины сопротивления металлов пластической деформации зависит прежде всего уровень энергосиловых параметров процесса и, следовательно, мощность, которую необходимо подвести в очаг деформации.

На величину сопротивления металлов пластической деформации влияет множество факторов, наиболее значимые из которых: тип кристаллической решетки металла, его химический состав, степень и скорость деформации, температура металла, история развития деформации во времени и др. [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 нашел 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 °С) и для горячей (800–1200 °С) деформации [3, 5–9]. Как следствие, известные методики нельзя распространить на случай теплой деформации (для сталей это диапазон температур от 300 до 800 °С) и к тому же многие из них не учитывают влияние деформации, накопленной на предыдущих производственных этапах.

Достаточно корректные и научно обоснованные методики определения сопротивления металла пластической деформации как функционала, учитывающего историю деформирования, представлены в работе [10, 11]. Однако эти методики приводят к необходимости ре-

шения интегральных уравнений, что связано с существенными математическими трудностями. Поэтому в работе [11] 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 [12]

$$\Delta\sigma_S = \Delta\sigma_{S0} \exp\left(-\frac{\Delta t}{k}\right), \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma_S$  – величина остаточного упрочнения через промежуток времени  $\Delta t$  после окончания процесса деформирования;  $\Delta\sigma_{S0}$  – величина упрочнения металла в конце процесса деформации;  $k$  – эмпирический коэффициент, который характеризует скорость процессов разупрочнения и зависит от температуры металла [11].

Для определения численных значений коэффициента  $k$  была проведена серия испыта-

ний на комплексе Gleeble 3800. Данный комплекс в последнее время широко применяется для исследования процессов деформации [6, 8, 9, 13, 12]. Как было сказано выше, исследования проводились на трубной стали 32ХГА. Данная марка стали широко используется при производстве бесшовных труб для нефтегазовой промышленности. По результатам эксперимента для этой стали были построены кривые зависимости ее сопротивления деформации от степени деформации в диапазоне температур от 20 до 1200 °С. Для определения коэффициента разупрочнения были использованы результаты испытаний при температурах от 300 до 1200 °С, 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 рис. 1 видно, что с ростом температуры деформации увеличивается величина разупрочнения.

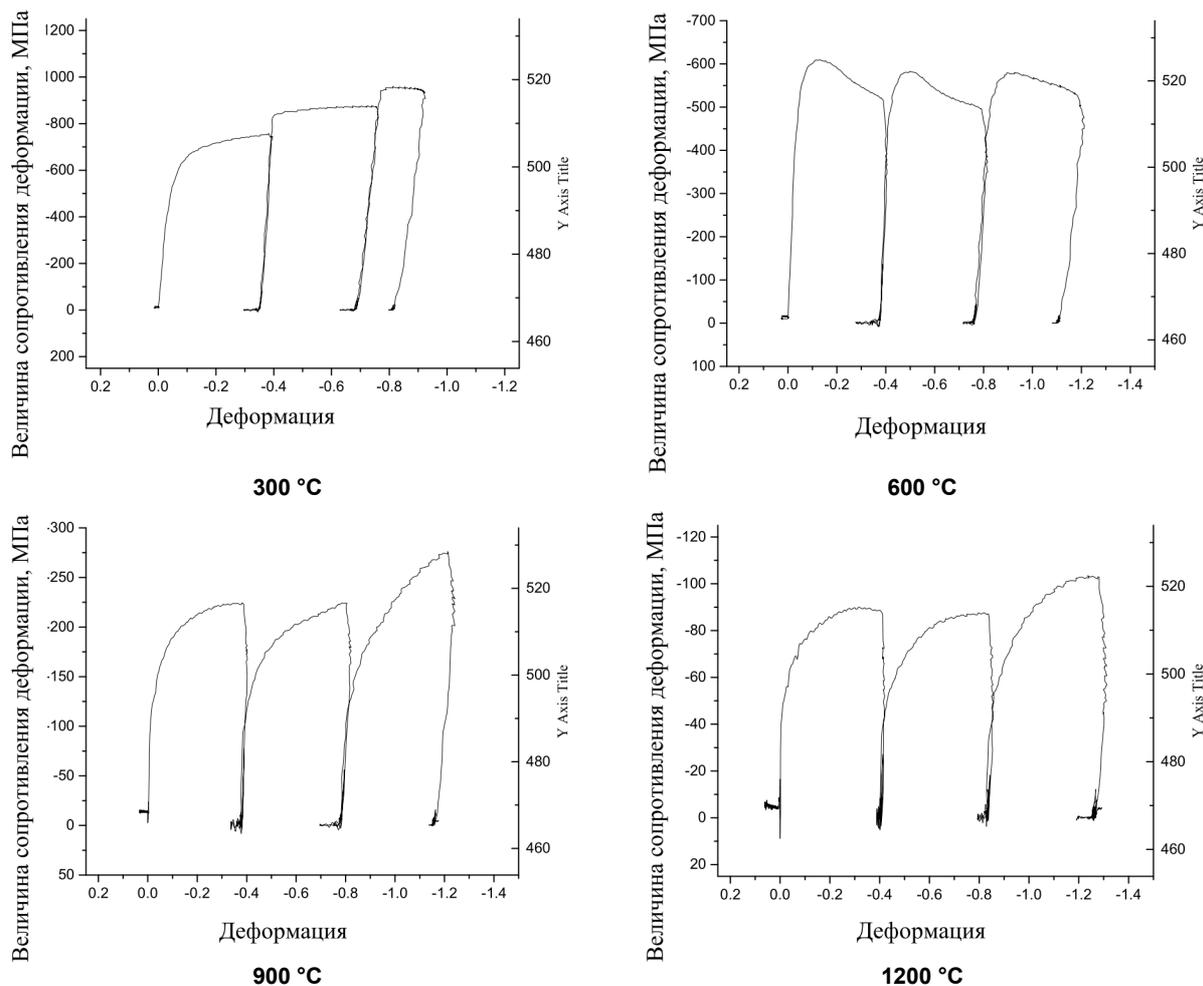


Рис. 1. Зависимость величины сопротивления деформации стали 32ХГА от величины деформации при различных температурах

## Обработка металлов давлением...

На основе зависимостей, полученных в результате испытания образцов на сжатие, были получены значения коэффициентов, входящих в зависимости для расчета величины сопротивления деформации. Для этого кривые изменения величины сопротивления деформации и степени деформации представлялись в виде зависимостей от времени (рис. 2).

Величина коэффициента  $k$  определялась на основе экспериментальных данных по формуле

$$k = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta \sigma_s}{\Delta \sigma_{s0}}} \quad (2)$$

Определить зависимость коэффициента  $k$  от температуры оказалось возможным благодаря системам автоматизации установки Gleeble 3800. Поскольку, как видно из рис. 2, во время разупрочнения температура металла остается практически постоянной, полученная зависимость коэффициента разупрочнения от температуры имеет вид:

$$k = 0,0225 \left( \frac{1395 - \theta}{\theta + 20} \right), \quad (3)$$

где  $\theta$  – температура стали.

Для обработки экспериментальных и получения значений остальных коэффициентов использовали метод наименьших квадратов. В результате зависимость (1) для стали 32ХГА примет вид

$$\Delta \sigma_s = 542,266 \cdot \exp \left( - \frac{\Delta t}{0,0225 \left( \frac{1395 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right). \quad (4)$$

Для определения влияния деформационной составляющей упрочнения на величину сопротивления металла пластической деформации были проведены эксперименты по растяжению образцов из стали 32ХГА при комнатной температуре. Эксперименты также проводились на комплексе Gleeble 3800. После обработки полученных результатов с применением метода наименьших квадратов было получено уравнение, описывающее кривую упрочнения:

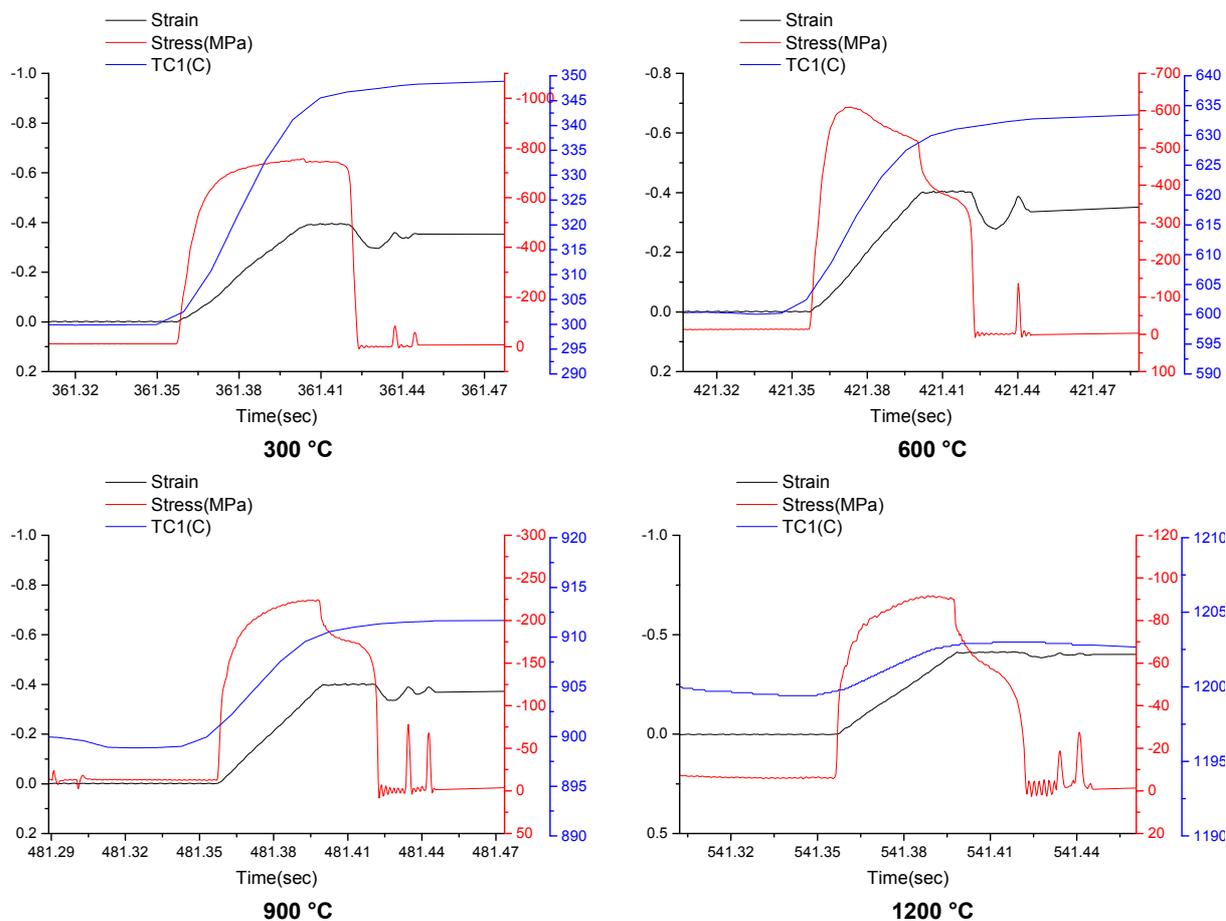


Рис. 2. Зависимости величины сопротивления деформации (—), температуры (—) и степени деформации (—) от времени



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

$$\sigma_{si} = 542 \exp \left[ -0,902 \left( \frac{\theta_0 - 20}{1395 - \theta_0} \right) \right]^{0,615} + \left\{ \sum_{i=1}^m 3796 (\Lambda_i^{0,91} - \Lambda_{i-1}^{0,91}) \left( \sigma_{s(i-1)} - 542 \exp \left[ -0,902 \left( \frac{\theta_0 - 20}{1395 - \theta_0} \right) \right]^{0,615} \right) \left( \exp \left( \frac{(-\Delta t)}{0,0225 \left( \frac{1395 - \theta}{\theta + 20} \right)} \right) - 1 \right) \right\}. \quad (7)$$

### Заклучение

В представленной работе выполнено комплексное исследование процессов упрочнения и разупрочнения стали 32ХГА в диапазоне изменения температуры от 20 до 1200 °С. Получено рекуррентное уравнение для расчёта величины сопротивления деформации металла в диапазоне температур от 20 до 1200 °С. Определена зависимость для вычисления коэффициента разупрочнения стали.

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

### Литература

1. Коликов, А.П. Теория обработки металлов давлением / А.П. Коликов, Б.А. Романцев. – М.: Издат. Дом МИСиС, 2015. – 451 с.
2. Остапенко, А.Л. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета / А.Л. Остапенко, Л.А. Забира // Чёрная металлургия. – 2009. – № 3 (1311). – С. 54–79.
3. Хензель, А. Расчет энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: справ. изд.: пер. с нем. / А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
4. Зильберг, Ю.В. Теория обработки металлов давлением / Ю.В. Зильберг. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 434 с.
5. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
6. Ишимов, А.С. К вопросу выбора математической функции уравнения состояния для описания реологических свойств стали 20

в процессе горячей пластической деформации / А.С. Ишимов, М.П. Барышников, М.В. Чукин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2015. – № 1 (49). – С. 43–52.

7. New model predicting flow curves in wide range of thermomechanical conditions of 38MnVS6 steel / P. Opěla, I. Schindler, P. Kawulok et al. // METAL 2016 – International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 25.05–27.05 2016, Brno, Czech Republic, EU. – P. 458–463.

8. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe–40 at.%Al / R. Kawulok, P. Opěla, I. Schindler, P. Kawulok // METAL 2013 – 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. May 15–17 2013, Brno, Czech Republic, EU. – P. 444–449.

9. Hot flow stress models of the steel C45 / P. Opěla, I. Schindler, P. Kawulok et al. // Metalurgija – Sisak then Zagreb. – 2015. – Т. 54, № 3. – С. 469–472.

10. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та. – УПИ, 2001. – 836 с.

11. Дукмасов, В.Г. Математические модели и процессы прокатки профилей высокого качества / В.Г. Дукмасов, А.В. Выдрин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 215 с.

12. Аль-Кхузаи, А.С.О. Анализ возможности применения универсальной феноменологической модели сопротивления металла пластической деформации / А.С.О. Аль-Кхузаи, А.В. Выдрин, В.В. Широков // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением. – 2018. – № 4 (27). – С. 61–69.

13. Poliak, E.I. Initiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation / E.I. Poliak, J.J. Jonas // ISIJ International. – 2003. – Vol. 43, no. 5. – P. 684–691.

Аль-Кхузаи Ахмед Салим Олейви, аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; asaalkhuzai@mail.ru.

Широков Вячеслав Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; shirokovvv@susu.ru; ORCID ID: 0000-0003-1663-9362.

Выдрин Александр Владимирович, д-р техн. наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vydrinav@susu.ru.

Поступила в редакцию 3 января 2020 г.

DOI: 10.14529/met200109

## RESEARCH OF PLASTIC RESISTANCE OF STEEL 32CrMn

A.S.O. Al-Khuzai, asaalkhuzai@mail.ru,

V.V. Shirokov, shirokovvv@susu.ru,

A.V. Vydrin, vydrinav@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The value of metal resistance to plastic deformation is an important aspect in the design and calculation of metal processing. Despite this, there are many calculation methods today, the calculation results for which can differ significantly from each other. Also, the values of empirical coefficients used for calculation were determined and published not for all grades of steel. Moreover, the calculation methods and published values of the numerical coefficients are different for the processes of cold and hot deformation. The temperature range from 300 to 600 °C remains the least studied. This article is concerned with the study of the plastic deformation resistance of 32CrMn (32ХГА) steel, taking into account its functional properties, and continues a series of articles based on the results of the studies by the authors. The choice of this steel grade is due to the fact that it is widely used in the production of seamless pipes for the oil and gas industry. This study was carried out according to a unified method for the temperature range from room temperature to temperatures close to the melting point. This allows one to use the obtained results in calculating all possible technological operations for the production of pipes, including pipe straightening in the heat sections of pipe rolling plants, and moulding longitudinal welded pipes.

A series of tests was conducted on the Gleeble 3800 complex to determine the numerical values of the coefficients characterizing the steel grade under consideration. The values of the coefficient characterizing the softening of the metal were determined from the obtained curves of deformation resistance for the temperature range from 300 to 1200 °C. A recurrence dependence that allows one to calculate the value of deformation resistance taking into account softening in a wide temperature range was obtained from the test results.

*Keywords: softening, microstructure, plastic deformation, metal resistance.*

### References

1. Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Moscow MISiS Publ., 2015. 451 p.
2. Ostapenko A.L., Zabira L.A. [The deformation resistance of steels during rolling and the methods of its calculation]. *Ferrous Metallurgy*, 2009, no. 3 (1311), pp. 54–79. (in Russ.)
3. Hensel A., Spittel T. *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. Leipzig, 1978.
4. Zil'berg Yu.V. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of metal forming]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2009. 434 p.
5. Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I. *Mekhanicheskiye svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniyem* [Mechanical properties of metals and alloys during pressure processing]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1973. 224 p.

6. Ishimov A.S., Baryshnikov M.P., Chukin M.V. [To the question of choosing the mathematical function of equation of state for description of the rheological properties became 20 in the process of hot plastic deformation]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*, 2015, no. 1 (49), pp. 43–52. (in Russ.)

7. 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

8. Kawulok R., Opěla P., Schindler I., Kawulok P. Model of hot deformation resistance of the iron aluminide of the type Fe–40at.%Al. *METAL 2013 – 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, May 15–17 2013, Brno, Czech Republic, EU. pp. 444–449.

9. 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*, 2015, vol. 54, no. 3. pp. 469–472.

10. Kolmogorov, V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniyem* [Mechanics of metal forming]. Ekaterinburg, Publishing House of the Ural State Technical University – UPI, 2001. 836 p.

11. Dukmasov V.G., Vydrin A.V. *Matematicheskiye modeli i protsessy prokatki profilye vysokogo kachestva* [Mathematical models and processes of rolling with a high-quality profile]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2002. 215 p.

12. Al'-Kkuzai A.S.O., Vydrin A.V., Shirokov V.V. [Analysis of the possibility of applying the universal phenomenological model of the resistance of metal to plastic deformation]. *Modelirovaniye i razvitiye protsessov obrabotki metallov davleniyem*, 2018, no. 4 (27), pp. 61–69. (in Russ.)

13. Poliak E.I., Jona J.J. SInitiation of Dynamic Recrystallization in Constant Strain Rate Hot Deformation. *ISIJ International*, 2003, vol. 43, no. 5, pp. 684–691.

*Received 3 January 2020*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аль-Кхузай, А.С.О. Исследование сопротивления пластической деформации стали марки 32ХГА / А.С.О. Аль-Кхузай, В.В. Широков, А.В. Выдрин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 80–86. DOI: 10.14529/met200109

### FOR CITATION

Al-Khuzai A.S.O., Shirokov V.V., Vydrin A.V. Research of Plastic Resistance of Steel 32CrMn. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 80–86. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200109

---