

Разработка рационального режима изотермической деформации хромистой стали 11X11H2B2MФ-Ш

М.И. Нагимов^{1†}, Ш.Х. Мухтаров¹, Ф.З. Утяшев¹, Р.Ю. Сухоруков²

[†]n_marsel@mail.ru

¹Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, Уфа, 450001, Россия

²Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН, Малый Харитоньевский переулок 4, Москва, 101990, Россия

Известно, что хромистые стали являются материалом для изготовления деталей ответственного назначения. Обычно детали из таких материалов изготавливают деформацией при комнатной температуре или горячей деформацией. В данной работе показана разработка режима деформации в изотермических условиях при высоких температурах. Приведены результаты исследований образцов из хромистой стали 11X11H2B2MФ-Ш после испытаний на одноосное растяжение при температурах в диапазоне 700—1100°C и при скоростях деформации 10^{-3} — 10^{-1} с⁻¹. Определены механические свойства стали в условиях одноосного растяжения. Показано, что максимальная пластичность проявляется в диапазоне температур 800—1000°C и скорости деформации 10^{-3} с⁻¹ и составляет от 115 до 103%, соответственно. В остальном исследуемом интервале температур и скоростей деформации, относительные удлинения δ варьируются в диапазоне от 65 до 85%, а относительные сужения ψ — в диапазоне 77—99%. По зависимостям истинные напряжения от степени деформации в исследуемом температурно-скоростном режиме показано, что наиболее протяженная установившаяся стадия течения наблюдается при скорости деформации 10^{-2} с⁻¹ и температурах 800—900°C. Проведены исследования структуры образцов после деформации на растяжение. Показано, что понижение температуры и скорости деформации приводит к формированию мелких зерен. Так после растяжения образца при температуре 800°C и скорости деформации 10^{-3} с⁻¹ на 115% происходило формирование глобулярных γ зерен со средним размером 3 мкм. После растяжения при температуре 1000°C средний размер γ зерен увеличился до 25 мкм.

Ключевые слова: сталь 11X11H2B2MФ-Ш, горячая деформация, механические свойства, структура

Development an effective isothermal deformation for chrome steel 11KH11N2V2MF-SH

M. I. Nagimov¹, Sh. Kh. Mukhtarov¹, F. Z. Utyashev¹, R. Yu. Sukhorukov²

¹Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., Ufa, 450001, Russia

²A. Blagodaravov Institute of Machines Science of the RAS, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russia

It is well known that chromium steels are the material for the manufacture of critical parts. Usually parts made out of such materials deformed at room or hot temperature. This paper shows the development mode for deformation under isothermal condition at hot temperatures. The investigation results of chromium steel 11Kh11N2V2MF-Sh specimens after uniaxial tensile test at temperatures in the range 700—1100°C and at the strain rates 10^{-3} — 10^{-1} s⁻¹ were presented. The mechanical properties of steel under uniaxial tension were determined. It is shown that the maximum ductility achieved within temperature range 800—1000°C and a strain rate of 10^{-3} s⁻¹, and was about 115—103%. At other investigated temperatures and strain rates the elongation was about 77—99% and reduction of area 65—85%. The most longest-stable stage flow is observed at a strain rate of 10^{-2} s⁻¹ and at temperatures 800—900°C, according to relationships between the true stress and the true strain in the tested temperature-strain rate conditions. The structure of the specimens after the tensile tests was investigated. It is shown that the decreasing temperature and strain rate leads to the formation of fine grains. Globular γ grains with a mean size of 3 μ m were formed after tension of specimen at 800°C and a strain rate of 10^{-3} s⁻¹ on elongation of about 115%. An average γ grain size increased to 25 μ m after tension at a temperature of 1000°C.

Keywords: 11Kh11N2V2MF-Sh steel, hot deformation, mechanical properties, structure

Введение

Хромистая сталь 11X11H2B2MФ-III (ЭИ962-III) широко используется для изготовления дисков компрессоров, лопаток и других нагруженных деталей ответственного назначения, длительно работающих при температурах до 600°C. Температура начала интенсивного окалинообразования при эксплуатации в воздушной среде у этой стали составляет 750°C [1].

При разработке технологического процесса и выборе рациональной скорости деформирования (скорости перемещения деформирующего инструмента), необходимо знать поведение материала в условиях, близких к реальному технологическому процессу. Это, в свою очередь, качественно и количественно показывают механические испытания.

В работе [2] были проведены исследования структуры и механических свойств хромистой стали при сжатии в диапазоне температур 700—1100°C и скоростей деформации 10^{-3} – 10^{-1} с⁻¹. Была показана принципиальная возможность изготовления из толстолистового материала осесимметричных конических заготовок методом раскатки в диапазоне температур 900—1100°C. Однако при таких температурах происходило интенсивное окалинообразование и растрескивание поверхностного слоя, что приводило к снижению количества годных деталей. При раскатке в заготовке действуют не только радиальные сжимающие, но и тангенциальные растягивающие и касательные напряжения, происходит увеличение поверхности заготовок. Поэтому проведение механических испытаний только на сжатие недостаточно для определения пластических свойств данного материала при раскатке в исследуемом диапазоне температур и скоростей деформации, что может затруднить выбор как определяющих соотношений при математическом моделировании [3], так и оптимальных температурно-скоростных режимов процесса раскатки. В этой связи, изучение механических свойств при растяжении, а также проведение структурных исследований, является актуальным.

Целью данной работы было определение механических, прежде всего, пластических свойств стали ЭИ962-III в условиях одноосного растяжения в широком диапазоне температур и скоростей деформации, а также изменения структуры стали в процессе деформации.

Материал и методики эксперимента

В качестве материала исследования использовали листовую хромистую сталь ЭИ962-III толщиной 12 мм. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Механические свойства на растяжение определяли в диапазоне температур 700—1100°C и скоростей деформации 10^{-3} с⁻¹— 10^{-1} с⁻¹ на универсальном динамометре INSTRON 5982 с использованием плоских образцов с размером рабочей части 4,5×2×20 мм. По результатам испытаний были построены зависимости «истинное напряжение — деформация». Значение степени деформации рассчитывали по формуле:

Таблица 1. Химический состав хромистой стали 11X11H2B2MФ-III
Table 1. The chemical composition of chromium steel 11Kh11N2V2MF-Sh

C	0,09-0,13
Si	до 0,6
Mn	до 0,6
Ni	1,5-1,8
S	до 0,025
P	до 0,03
Cr	10,5-12
Mo	0,35-0,5
W	1,6-2
V	0,18-0,3

$$e = \ln(l_k/l_0),$$

где l_0 – исходная длина рабочей части образца ($l_0=20$ мм), l_k — длина рабочей части после разрушения образца. Микроструктурные исследования проводили с использованием оптического микроскопа Olympus GX51 и сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 SBH.

Результаты эксперимента и обсуждение

Микроструктурные исследования стали показали, что в исходном состоянии наблюдается мартенситная структура со средним размером зерен γ фазы 10 мкм [2].

Как показали результаты механических испытаний во всем диапазоне температур и скоростей деформации, минимальное значение истинного напряжения течения (40 МПа) наблюдается при температуре 1100°C и скорости деформации 10^{-3} с⁻¹ (рис.1), а максимальное значение напряжения (287 МПа) при температуре 700°C и скорости деформации 10^{-1} с⁻¹ (рис.2). Зависимости

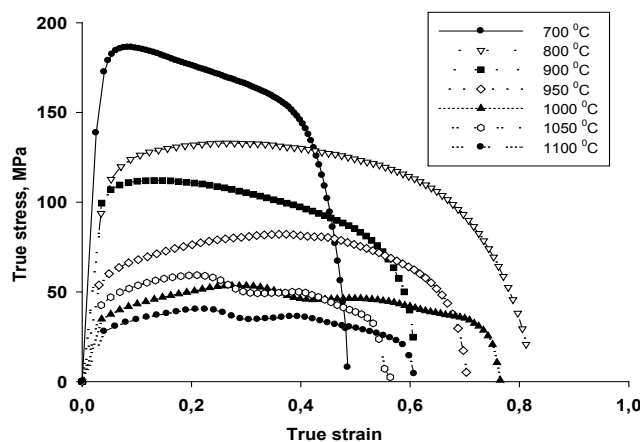


Рис. 1. Зависимости истинного напряжения течения от степени деформации стали 11X11H2B2MФ-III при различных температурах и скорости деформации 10^{-3} с⁻¹.

Fig. 1. The true stress versus true strain obtained as a result of tensile test specimens of the steel 11Kh11N2V2MF-Sh at strain rate of 10^{-3} s⁻¹ and different temperatures.

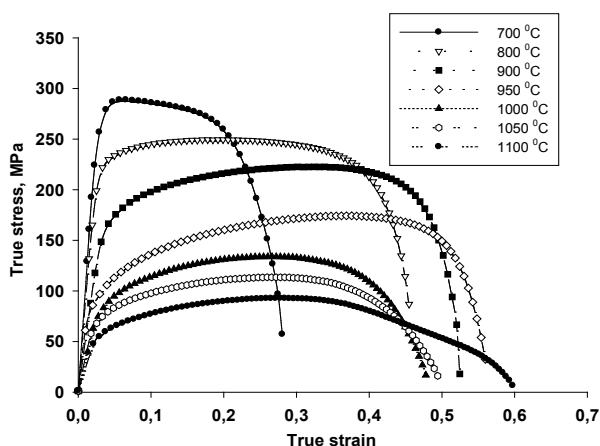


Рис. 2. Зависимости истинного напряжения течения от степени деформации при различных температурах и скорости деформации 10^{-1} c^{-1} .

Fig. 2. The true stress-true strain curves of the steel 11Kh11N2V2MF-Sh specimens at different temperatures and strain rate of 10^{-1} s^{-1} .

мости истинного напряжения течения от деформации при температуре 700 °C в исследуемом диапазоне скоростей деформации характеризуется разупрочнением при степени деформации более 0,05, что не наблюдается при других условиях. Наибольшие относительные удлинения δ проявляются при температурах 800 °C ($\delta=115\%$) и 1000 °C ($\delta=103\%$) при скорости деформации 10^{-3} c^{-1} . Но при 1000 °C поверхность образца была подвержена интенсивному образованию окалины и, как следствие, зарождению микротрещин, что может крайне отрицательно сказаться на процессе раскатки. При других условиях деформации в исследуемом интервале температур и скоростей относительные удлинения δ варьируются в диапазоне 65—85%, а относительные сужения Ψ — в диапазоне 77—99%.

Анализ зависимостей истинного напряжения от деформации стали ЭИ962-Ш показал, что при скорости

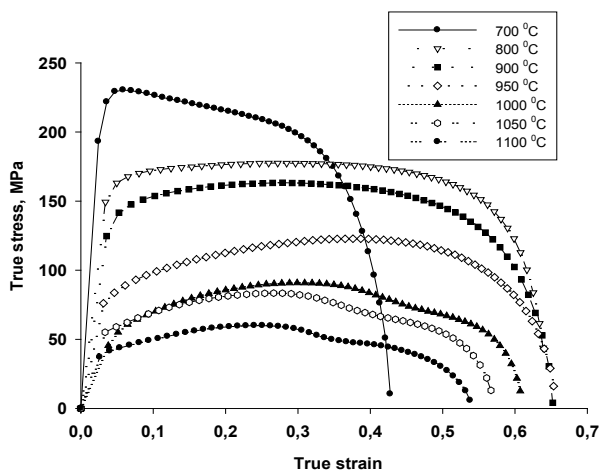


Рис. 3. Зависимости истинного напряжения течения от степени деформации при различных температурах и скорости деформации 10^{-2} c^{-1} .

Fig. 3. The relationships between the true stress and the true strain at different temperatures for the steel 11Kh11N2V2MF-Sh specimens deformed at strain rate of 10^{-2} s^{-1} .

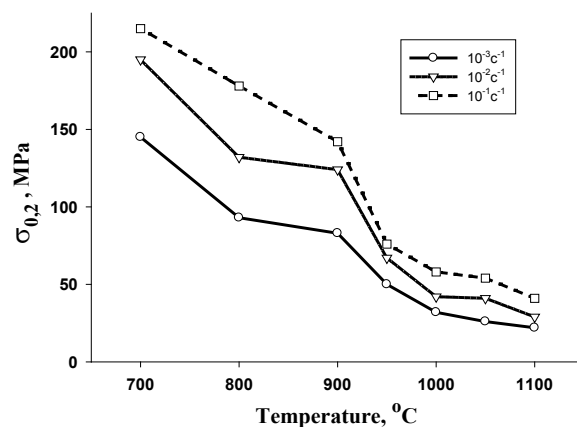


Рис. 4. Зависимости предела текучести стали 11X11N2B2MF-III от температуры и скорости деформации.

Fig. 4. The yield strength versus deformation temperature obtained as a result of tensile test specimens of the steel 11Kh11N2V2MF-Sh at the different strain rate.

деформации 10^{-3} c^{-1} (рис.1) в исследованном интервале температур стадия упрочнения наблюдается до степени деформации 0,1—0,2. Установившаяся стадия течения практически отсутствует. Стадия разупрочнения находится в интервале от степени деформации 0,1—0,2 до разрушения образца.

При скорости деформации 10^{-2} c^{-1} и температурах 800—900 °C (рис.3) установившаяся стадия течения наиболее протяженная (степень деформации 0,05—0,4), что не наблюдается во всех других случаях. Повышение температуры с 1000 до 1100 °C во всем диапазоне скоростей деформаций, приводит к интенсивному образованию окалины и резкому снижению напряжения течения.

Из рис.4 видно, что, с одной стороны, увеличение скорости деформации во всем исследованном температурном диапазоне приводит к увеличению предела текучести, а с другой, при температуре 950 °C, происходит резкое падение предела текучести при всех скоростях деформации. С увеличением температуры и снижении

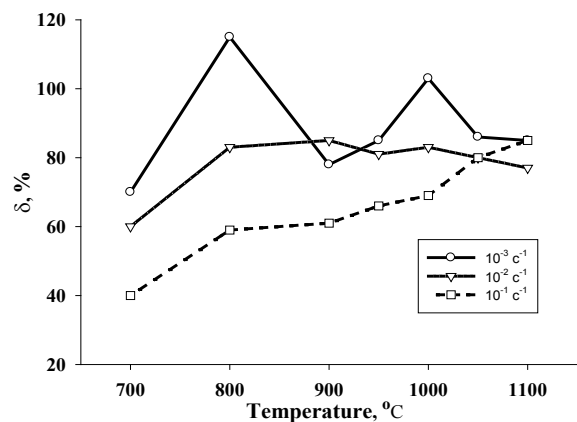


Рис. 5. Зависимости относительного удлинения стали 11X11N2B2MF-III от температуры и скорости деформации.

Fig. 5. The relationships between the relative elongation and temperature at the different strain rate for the steel 11Kh11N2V2MF-Sh.

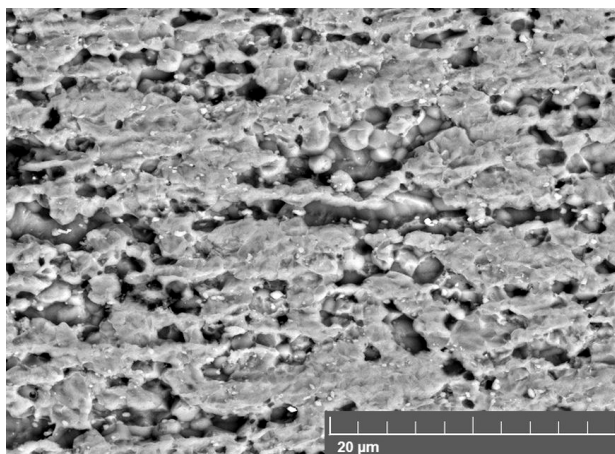


Рис. 6. Микроструктура шейки образца близкой к зоне разрыва после растяжения при температуре 800°C и скорости деформации 10^{-3} c^{-1} .

Fig. 6. Microstructure of the specimen close to the fracture after tension at 800°C and the strain rate 10^{-3} s^{-1} .

ем скорости деформации (рис.5) значения относительного удлинения повышаются, однако каждая зависимость имеет свои особенности. С температуры 700°C до 800°C значения относительного удлинения резко возрастают во всем диапазоне скоростей деформаций. При скорости деформации $\dot{\epsilon}=10^{-1} \text{ c}^{-1}$ дальнейшее повышение температуры до 1100°C практически не влияет на значение относительного удлинения.

Анализ микроструктуры образцов показал, что понижение температуры и скорости деформации приводит к формированию мелких зерен. Так, например, после растяжения образца при $T=800^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon}=10^{-3} \text{ c}^{-1}$ на $\delta=115\%$ происходило формирование глобулярных γ зерен со средним размером 3 мкм (рис.6).

Формирование γ зерен со средним размером 5 мкм наблюдалось у образца после растяжения при температуре 900°C и скорости деформации 10^{-1} c^{-1} ($\delta=61\%$). При температуре 950°C и скорости деформации 10^{-2} c^{-1} ($\delta=81\%$) средний размер γ зерен остается около 10 мкм. Исследование микроструктуры образца после растяжения при температуре 1000°C и скорости деформации 10^{-3} c^{-1} ($\delta=103\%$) показало, что средний размер γ зерен увеличился до 25 мкм.

Таким образом, анализ микроструктурных исследований показал, что изотермическую деформацию, при которой средний размер γ зерен увеличился до 25 мкм, следует проводить в интервале температур от 800 до 1000°C.

Низкая скорость деформации и высокая температура, при которой интенсивно образуется окалина, не всегда способствуют повышению пластичности, и это наглядно демонстрирует зависимость относительного удлинения от температуры при скорости деформации 10^{-3} c^{-1} (рис.5).

При скоростях деформации 10^{-2} — 10^{-1} c^{-1} наблюдаются наиболее протяженные стадии установившегося тече-

ния, что существенно увеличивает степень деформации без проявления эффекта локализации, который может способствовать преждевременному разрушению.

Выводы

При скоростях деформации в интервале 10^{-3} — 10^{-1} c^{-1} напряжение течения понижается с увеличением температуры деформации. При этом наиболее резкое снижение напряжения течения наблюдается при температуре 950°C. Повышение температуры деформации и формирование в структуре мелких глобулярных зерен приводит к повышению пластичности. Рациональный режим для изотермической деформации следующий: $T=800$ — 1000°C , $\dot{\epsilon}=10^{-2}$ — 10^{-1} c^{-1} .

Благодарности. Настоящая работа была выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы» (соглашение №14.604.21.0091 от 08.07.2014, уникальный идентификатор проекта прикладных научных исследований - RFMEFI60414X0091).

Acknowledgements. The work was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Federal Target Program “Investigation and Development in Focal Areas of the Research and Technology Center of Russia for 2014-2020” (Agreement No. 14.604.21.0091, unique identifier RFMEFI60414X0091).

Литература / References

1. State standart 5632—72. High-alloy steels and corrosion-proof, heat-resisting and heat treated alloys. Grades. The Ministry of ferrous metallurgy of the USSR (1975) 37 p. (in Russian) [ГОСТ 5632—72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Министерство черной металлургии СССР (1975) 37 с.]
2. Sh.Kh. Mukhtarov, M.I. Nagimov, A.A. Zakirova, P.A. Klassman, F.Z. Utyashev. Perspektivnye materialy. **15**, 92—96 (2013). (in Russian) [Ш.Х. Мухтаров, М.И. Нагимов, А.А. Закирова, П.А. Классман, Ф.З. Утяшев. Перспективные материалы. **15**, 92—96 (2013).]
3. E.A. Valitova, A.Kh. Akhunova, V.A. Valitov, S.V. Dmitriev, R.Ya. Lutfullin, M.Kh. Mukhametrakhimov. Letters on Materials. **4** (3), 190—194 (2014). (in Russian) [Э.А. Валитова, А.Х. Ахунова, В.А. Валитов, С.В. Дмитриев, Р.Я. Лутфуллин, М.Х. Мухаметрахимов. Письма о материалах. **4** (3), 190—194 (2014).]