

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЗОТИСТОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 04X20H6Г11M2АФБ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ РАСТЯЖЕНИИ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ –70 ДО +140 °С

© 2015

**Р.А. Саврай**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией конструкционного материаловедения  
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

**А.В. Макаров**, доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения,  
заведующий лабораторией механических свойств  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева

Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

**Э.С. Горкунов**, академик РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

**Н.Л. Печеркина**, старший научный сотрудник  
Институт физики металлов имени М.Н. Михеева

Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

**С.А. Роговая**, младший научный сотрудник

**А.Л. Осинцева**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург (Россия)

**Г.Ю. Калинин**, кандидат технических наук, начальник лаборатории

**С.Ю. Мушников**, кандидат технических наук, начальник сектора

Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей»,  
Санкт-Петербург (Россия)

**Ключевые слова:** высокоазотистая коррозионностойкая сталь; микроструктура; статическое растяжение; механические свойства; фрактография.

**Аннотация:** Введением значительных концентраций азота в аустенитные стали различных систем легирования достигаются высокие показатели прочности, пластичности, коррозионной стойкости, трибологических свойств. При эксплуатации в условиях низких температур металлических изделий и конструкций существенно возрастает опасность их хрупкого разрушения при различных видах объемного и контактного нагружения. Однако до настоящего времени комплексному изучению механических характеристик (в том числе пластичности, вязкости, трещиностойкости) азотистых сталей при отрицательных температурах испытаний не уделялось столь пристального внимания, как при изучении механических свойств при комнатной температуре.

В настоящей работе проведен комплекс исследований по определению механических свойств и изучению фрактографических особенностей разрушения и эволюции структуры при испытаниях на растяжение при температурах испытаний –70...+140 °С коррозионностойкой азотсодержащей стали 04X20H6Г11M2АФБ (0,47 масс. % N) с аустенитной структурой. Обнаружен новый эффект более интенсивного роста прочностных характеристик стали 04X20H6Г11M2АФБ в условиях испытаний на статическое растяжение при понижении температуры испытания в интервале от +50 до –70 °С по сравнению с упрочнением при снижении температуры испытания в диапазоне более высоких температур (от +140 до +50 °С) при одновременном некотором росте значений характеристик пластичности в условиях испытаний на растяжение при температурах ниже +20 °С по сравнению с испытаниями при более высоких температурах. Установлено сохранение преимущественно вязкого характера разрушения стали 04X20H6Г11M2АФБ при понижении температуры испытаний на растяжение вплоть до –70 °С, что соответствует нижней границе интервала отрицательных климатических температур.

### ВВЕДЕНИЕ

Введением значительных концентраций азота в аустенитные стали различных систем легирования достигаются высокие показатели прочности, пластичности, коррозионной стойкости, трибологических свойств [1–8]. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» совместно с ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН с участием ИФМ УрО РАН разработаны составы, а также режимы термических и термомеханических обработок аустенитных сталей типа 04X20H14Г6M2АСБ и 04X20H6Г11M2АФБ с 0,3–0,5 масс. % азота, в которых высокая прочность сочетается с удовлетворительной пластичностью и коррозионной стойкостью [9–16]. Указанные сложнолегированные азотсодержащие аустенитные стали перспективны в качестве корпусных материалов в судостроении, в частности для создания плакирующего слоя двухслойных сталей для корпусов ледоколов большой мощности [17].

При эксплуатации в условиях низких температур металлических изделий и конструкций существенно возрастает опасность их хрупкого разрушения при различных видах объемного и контактного нагружения. Однако до настоящего времени комплексному изучению механических характеристик (в том числе пластичности, вязкости, трещиностойкости) азотистых сталей при отрицательных температурах испытаний не уделялось столь пристального внимания, как при изучении механических свойств при комнатной температуре. В отдельных работах применительно к воздействию на механические свойства азотистых сталей низких температур отмечается более интенсивный рост предела текучести аустенитной Cr-Ni-Mn стали при низких температурах в случае легирования азотом (по сравнению с углеродом). Это связывают с особенностями влияния азота на температурную зависимость энергии дефектов

упаковки [18] и магнитное состояние сталей [19]. Вместе с тем роль других возможных структурных факторов в формировании характеристик низкотемпературной прочности и пластичности азотсодержащих высоколегированных сталей остается в значительной степени неизученной. В этой связи, для наиболее полного изучения указанных факторов целесообразно провести механические испытания как при отрицательных температурах, так и при температурах существенно выше комнатной.

Целью настоящей работы явилось исследование механических характеристик коррозионностойкой азотсодержащей стали 04X20H6Г11М2АФБ при статическом растяжении в диапазоне температур от  $-70$  до  $+140$  °С.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводили на образцах, вырезанных из листовой заготовки толщиной 20 мм горячекатаной азотсодержащей стали 04X20H6Г11М2АФБ, предоставленной ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Химический состав стали представлен в таблице 1.

Механические испытания на одноосное растяжение при температурах  $-70...+140$  °С проводили на сервогидравлической испытательной установке Instron 8801. Абсолютная инструментальная погрешность измерения величины удлинения при этом составила около 0,2 %. Образцы для механических испытаний вырезали вдоль направления прокатки исходного листа. Поверхности разрушения образцов изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с применением микроскопа Tescan VEGA II XMU. Исследование тонкой структуры осуществляли методом электронной просвечивающей микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEOL JEM-200CX с применением механического и электролитического утонения заготовок (фольг).

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1. представлены электронно-микроскопические изображения структуры стали 04X20H6Г11М2АФБ. Исследование методом просвечивающей микроскопии исходной структуры стали показывает (рис. 1 а, б), что в результате горячей прокатки формируется достаточно неоднородная структура, в которой присутствуют как нерекристаллизованные, так и рекристаллизованные деформированные зерна. Встречаются участки структуры с вытянутыми преимущественно в одном направлении субзернами аустенита с дислокациями различной плотности, закрепленными дисперсными нитридами (карбонитридами) ванадия и хрома [20] (см. рис. 1 а). В других участках наблюдается сетчатая дислокационная структура и рекристаллизованные зерна с двойниками отжига (см. рис. 1 б).

На рис. 2 представлены механические свойства исследованной стали после испытаний на растяжение при

температурах  $-70...+140$  °С. Видно, что с уменьшением температуры испытания от  $+140$  до  $-70$  °С у стали 04X20H6Г11М2АФБ наблюдается линейное увеличение характеристик прочности:  $\sigma_{0,2}$  от 450 до 800 МПа,  $\sigma_b$  от 810 до 1250 МПа и  $\sigma_k$  от 530 до 990 МПа, которое можно разделить на два температурных интервала. Границы температурных интервалов, характеризующихся разной интенсивностью упрочнения, находятся в пределах от  $+140$  до  $+50$  °С и от  $+50$  до  $-70$  °С (рис. 2 а). Таким образом, граница между температурными интервалами составила порядка  $+50$  °С. При этом в данных температурных интервалах характеристики пластичности  $\delta_p$ ,  $\delta_5$  и  $\delta_{сопр}$  имеют различные значения, в среднем постоянные для данного интервала и составляющие  $\delta_p=27,1$  %,  $\delta_5=38,3$  %,  $\delta_{сопр}=11,2$  % в температурном интервале от  $+140$  до  $+50$  °С и  $\delta_p=30,3$  %,  $\delta_5=44,5$  %,  $\delta_{сопр}=14,2$  % в температурном интервале от  $+50$  до  $-70$  °С (рис. 2 б).

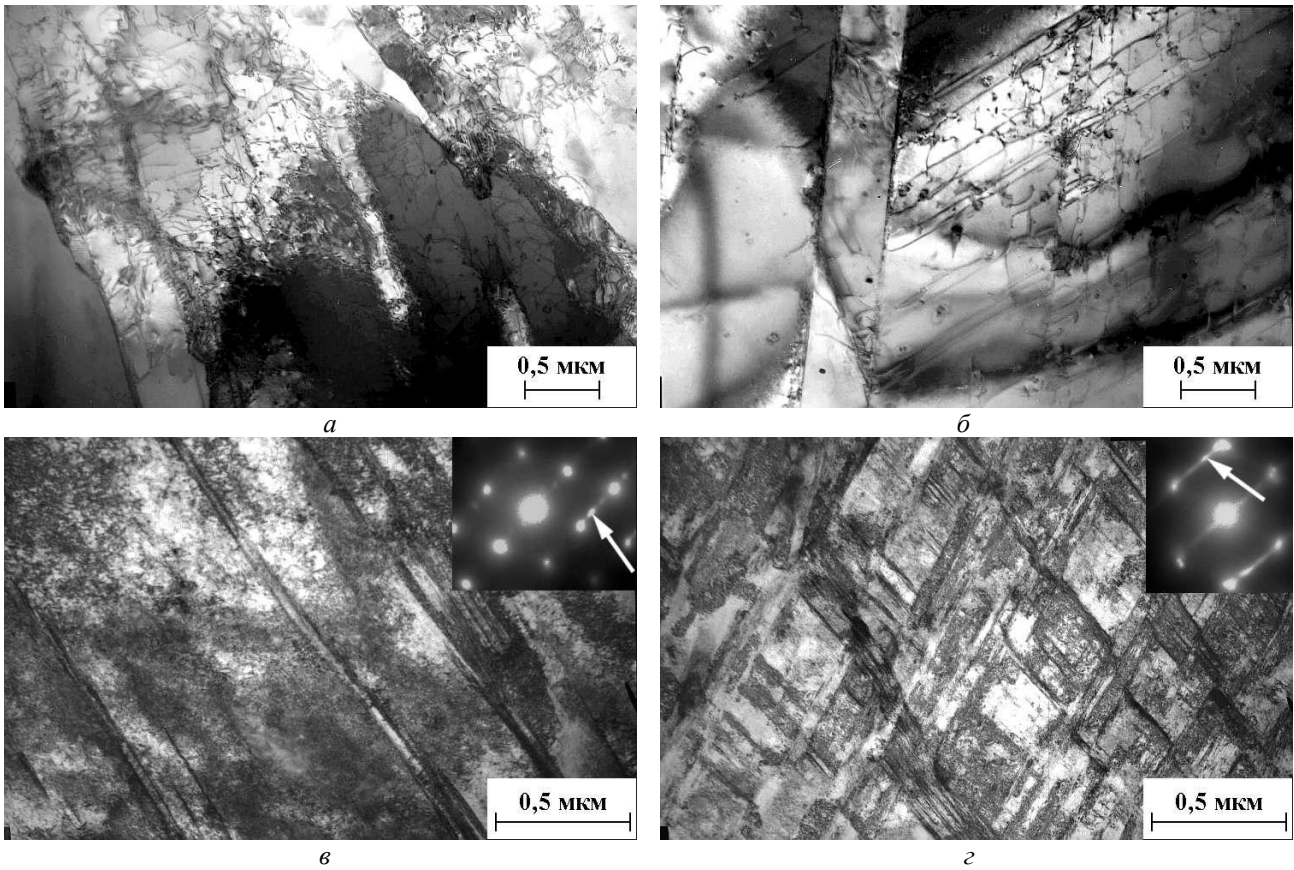
Таким образом, при понижении температуры испытания характеристики пластичности скачкообразно возрастают при переходе от одного температурного интервала к другому, и при отрицательных температурах наблюдается упрочнение аустенитной стали 04X20H6Г11М2АФБ при одновременном некотором росте ее пластичности. Следовательно, можно говорить об обнаружении нового эффекта более интенсивного роста прочностных характеристик стали 04X20H6Г11М2АФБ в условиях испытаний на статическое растяжение при понижении температуры испытания в интервале от  $+50$  до  $-70$  °С по сравнению с упрочнением при снижении температуры испытания в диапазоне более высоких температур (от  $+140$  до  $+50$  °С) при одновременном увеличении пластичности в условиях испытаний при пониженных температурах.

Электронно-микроскопическое исследование металла вблизи излома испытанных на растяжение образцов стали 04X20H6Г11М2АФБ показало, что в структуре образца, разрушенного при  $140$  °С, возникает плотная дислокационная субструктура с чередующимся контрастом, на фоне которой видны отдельные двойники (рис. 1 в). Рис. 1 г свидетельствует, что при понижении температуры испытания до  $-70$  °С интенсивность двойникования аустенита существенно возрастет, могут возникать даже две системы двойников, а внутри многочисленных параллельных полос отмечается значительно более высокая плотность дислокаций, чем в исходном горячекатаном состоянии (см. рис. 1 а, б). Представленные на рис. 1 в, г электронограммы также показывают наличие двойников в структуре стали после испытаний на растяжение.

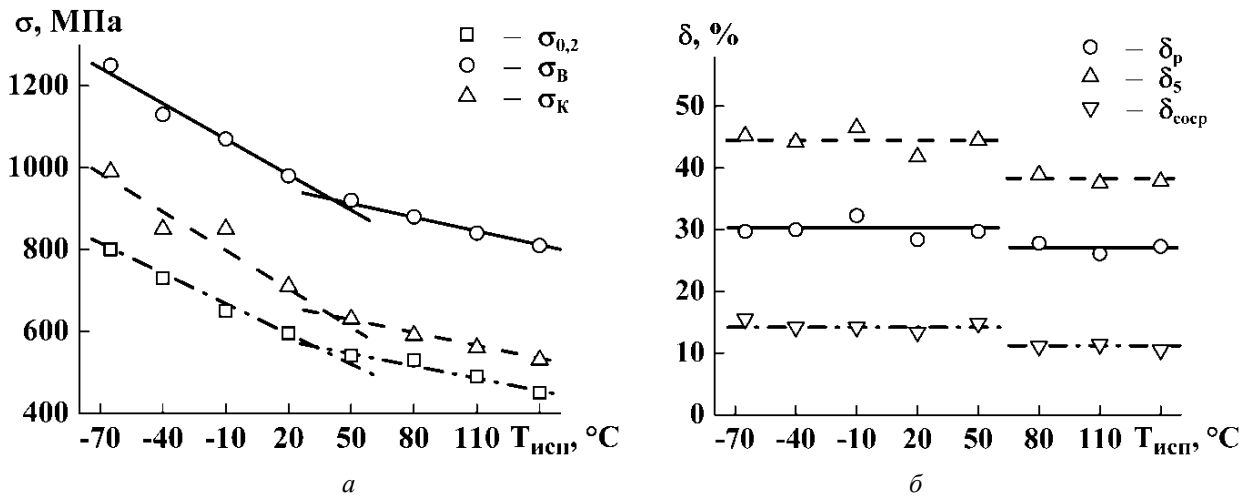
Деформационные процессы в метастабильных аустенитных сталях с ТРИП/ТВИП-эффектом отличаются большим набором механизмов, взаимодействующих друг с другом сложным образом и сильно зависящих от стабильности аустенита, определяемой химическим составом и температурой. Кроме дислокационного

Таблица 1. Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, масс. %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb+V	N
0,04	0,15	10,14	0,02	0,01	18,97	6,70	1,34	0,10	0,01	0,31	0,47



**Рис. 1.** Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 04X20H6Г11М2АФБ в исходном горячедеформированном состоянии (а, б) и после испытаний на растяжение при температурах +140 °С (в) и -70 °С (z): светлопольные изображения (а-г) и микродифракции (в, z). Стрелками указаны двойниковые рефлексы



**Рис. 2.** Зависимость механических характеристик стали 04X20H6Г11М2АФБ от температуры испытания при статическом растяжении:  
 а – прочностные характеристики  
 (условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$ , напряжение разрушения  $\sigma_K$ );  
 б – пластические характеристики  
 (равномерное  $\delta_p$ , общее  $\delta_5$  и сосредоточенное  $\delta_{соср}$  удлинение)

скольжения, элементарные механизмы включают двойникование, образование дефектов упаковки и фазовое превращение с образованием  $\alpha'$ -мартенсита [21], а также  $\epsilon$ -мартенсита [22]. При этом отмечается, что двойникование может приводить к более интенсивному упрочнению и увеличению относительного удлинения при механических испытаниях на растяжение [22; 23]. В частности, ослабление процесса двойникования с ростом температуры механических испытаний от 20–150 °С до 250 °С на растяжение высокомарганцевой аустенитной нержавеющей стали, комплексно легированной углеродом и азотом (в масс. %: 14,6 Сг; 15,9 Мп; 0,31 С; 0,29 N), приводит к уменьшению общего удлинения образца на ~7 % [23].

Таким образом, обнаружен новый эффект более интенсивного роста прочностных характеристик стали 04X20H6Г11М2АФБ в условиях испытаний на растяжение при пониженных температурах при одновременном увеличении характеристик пластичности в интервале более низких температур нагружения. Согласно рис. 1 в, г деформация при –70 °С приводит к сильному росту плотности двойников по сравнению с деформацией при 140 °С. Следовательно, отмеченный эффект может быть обусловлен более интенсивным двойникованием аустенита в условиях испытаний на растяжение при пониженных температурах. Влияние других возможных факторов (развитие фазовых  $\gamma \rightarrow \alpha'$  и  $\gamma \rightarrow \epsilon$  превращений, изменение магнитного состояния аустенита) требует дополнительных исследований.

Результаты фратографических исследований поверхностей разрушения представлены на рис. 3, 4. Видно, что разрушение исследованной стали носит преимущественно вязкий характер при всех температурах механических испытаний. Однако с уменьшением температуры растяжения до –70 °С в изломах наряду с участками вязкого ямочного разрушения, образованных по механизму слияния микропор [24], появляются элементы хрупкого разрушения: вторичные трещины и отдельные фасетки хрупкого разрушения сколом (рис. 4 в, е).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены механические свойства коррозионностойкой аустенитной азотсодержащей стали

04X20H6Г11М2АФБ при испытаниях на растяжение при температурах –70...+140 °С.

Установлено, что с уменьшением температуры испытания от +140 до –70 °С у стали 04X20H6Г11М2АФБ наблюдается линейное увеличение характеристик прочности (условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  от 450 до 800 МПа, временного сопротивления разрыву  $\sigma_b$  от 810 до 1250 МПа и напряжения разрушения  $\sigma_k$  от 530 до 990 МПа), которое можно разделить на два температурных интервала, характеризующихся разной интенсивностью упрочнения. Границы указанных температурных интервалов находятся в пределах от +140 до +50 °С и от +50 до –70 °С: при понижении температуры испытаний на растяжение в интервале от +50 до –70 °С наблюдается более интенсивный рост прочностных характеристик стали 04X20H6Г11М2АФБ по сравнению с упрочнением при снижении температуры испытания в диапазоне температур от +140 до +50 °С. При этом в данных температурных интервалах характеристики пластичности равномерное  $\delta_p$ , общее  $\delta_5$  и сосредоточенное  $\delta_{собр}$  удлинения имеют различные значения, в среднем постоянные для данного интервала ( $\delta_p=27,1\%$ ,  $\delta_5=38,3\%$ ,  $\delta_{собр}=11,2\%$  в температурном интервале от +140 до +50 °С и  $\delta_p=30,3\%$ ,  $\delta_5=44,5\%$ ,  $\delta_{собр}=14,2\%$  в температурном интервале от +50 до –70 °С).

Таким образом, обнаружен новый эффект более интенсивного роста прочностных характеристик стали 04X20H6Г11М2АФБ в условиях испытаний на растяжение при понижении температуры испытаний в интервале от +50 до –70 °С по сравнению с упрочнением при снижении температуры испытаний в диапазоне более высоких температур (от +140 до +50 °С) при одновременном увеличении характеристик пластичности в интервале более низких температур испытаний. Указанный эффект может быть обусловлен более интенсивным двойникованием аустенита в условиях испытаний на растяжение при пониженных температурах, а также другими факторами, требующими дополнительных исследований.

Фратографическими исследованиями для азотистой аустенитной стали 04X20H6Г11М2АФБ установлено сохранение преимущественно вязкого характера разрушения при понижении температуры испытаний

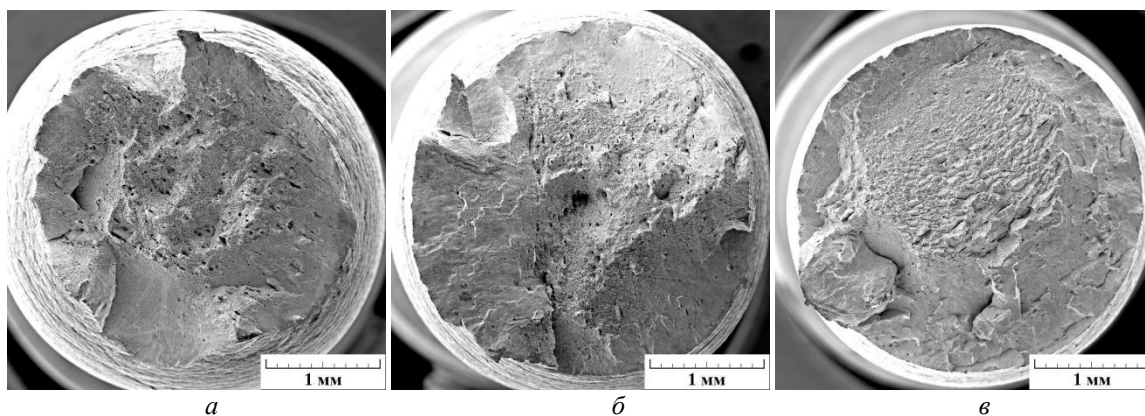
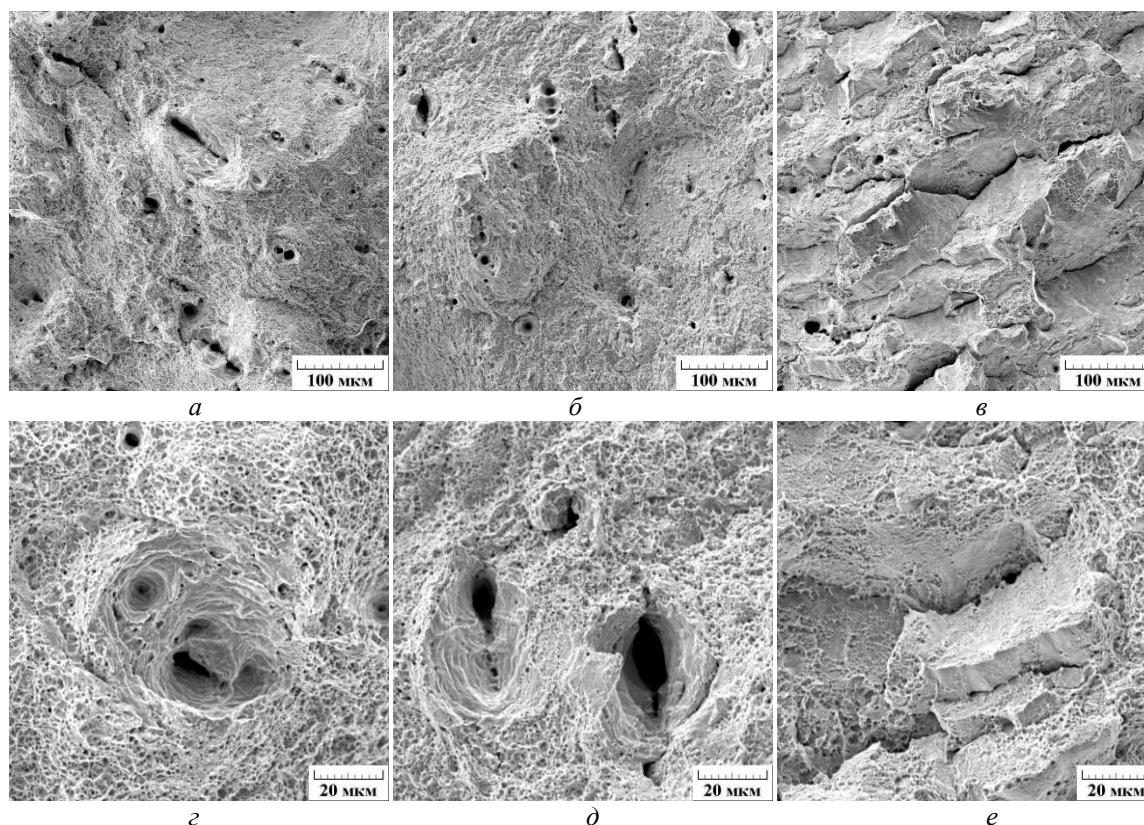


Рис. 3. Изломы (общий вид) после испытаний на растяжение образцов стали 04X20H6Г11М2АФБ: а – при температуре +140 °С; б – при температуре +20 °С; в – при температуре –70 °С



**Рис. 4.** Изломы (зона зарождения и роста трещины) после испытаний на растяжение образцов стали 04X20H6Г11М2АФБ: а, г – при температуре +140 °С; б, д – при температуре +20 °С; в, е – при температуре –70 °С

на растяжение вплоть до  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что соответствует нижней границе интервала отрицательных климатических температур.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Структура» № 01201463331 (проект № 15-15-2-16) и в соответствии с планом Фундаментальных научных исследований Государственных академий наук на 2013–2020 годы по теме № 01201375904.

Механические испытания и электронная сканирующая микроскопия выполнены в ЦКП «Пластометрия» ИМАШ УрО РАН.

Электронная просвечивающая микроскопия выполнена в Центре коллективного пользования «Электронная микроскопия» УрО РАН – отделе электронной микроскопии «Испытательного центра нанотехнологий и перспективных материалов» ИФМ УрО РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинов В.М., Банных О.А., Пойменов И.Л., Рашев Ц.В., Андреев Ч.А., Саръиванов Л.А. Износостойкость высокоазотистых немагнитных хромомарганцевых сталей // *Металлы*. 1982. № 6. С. 142–145.
2. Коршунов Л.Г., Гойхенберг Ю.Н., Терещенко Н.А., Уваров А.И., Макаров А.В., Черненко Н.Л. Износостойкость и структура поверхностного слоя азотсодержащих нержавеющей аустенитных сталей при трении и абразивном воздействии // *Физика металлов и металловедение*. 1997. Т. 84. № 5. С. 137–149.
3. Gavriljuk V.G., Berns H. High nitrogen steel: structure, properties, manufacture, applications. Berlin: Springer, 1999. 378 p.
4. Костина М.В., Банных О.А., Блинов В.М. Особенности сталей, легированных азотом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2000. № 12. С. 3–6.
5. Банных О.А. Экономичные нержавеющие азотистые стали как перспективный заменитель легких сплавов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2005. № 7. С. 9–13.
6. Березовская В.В., Банных О.А., Костина М.В., Блинов Е.В., Шестаков А.И., Саврай Р.А. Влияние термической обработки на структуру и свойства высокоазотистой аустенитной коррозионно-стойкой стали 03X20AG11H7M2 // *Металлы*. 2010. № 2. С. 34–43.
7. Березовская В.В., Саврай Р.А., Меркушкин Е.А., Макаров А.В. Исследование структуры, механических и коррозионных свойств новых высокоазотистых Cr-Mn-сталей с молибденом // *Металлы*. 2012. № 3. С. 31–39.
8. Горкунов Э.С., Макаров А.В., Задворкин С.М., Осинцева А.Л., Митропольская С.Ю., Буров С.В., Саврай Р.А., Роговая С.А., Рашев Ц.В., Жекова Л. Электромагнитный контроль фазового состава, твердости и износостойкости высокоазотистых нержавеющей сталей // *Дефектоскопия*. 2012. № 12. С. 19–30.

9. Горынин И.В., Рыбин В.В., Малышевский В.А., Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Малахов Н.В., Ямпольский В.Д. Создание перспективных принципиально новых коррозионно-стойких корпусных сталей, легированных азотом // Вопросы материаловедения. 2005. № 2. С. 40–54.
10. Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. Исследования эволюции структуры азотистой коррозионно-стойкой аустенитной стали 06X21AG10H7MФБ при термомеханическом и термическом воздействии // Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 9–19.
11. Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Нестерова Е.В., Фомина О.В., Харьков А.А. Исследования структуры и свойств высокопрочной коррозионно-стойкой азотистой стали 04X20H6Г11M2АФБ // Вопросы материаловедения. 2006. № 1. С. 45–53.
12. Сагарадзе В.В., Уваров А.И., Печеркина Н.Л., Малышевский В.А., Калинин Г.Ю., Ямпольский В.Д. Структура и механические свойства толстолистовой азотсодержащей аустенитной стали 04X20H6Г11AM2БФ // Физика металлов и металлургия. 2006. Т. 102. № 2. С. 250–256.
13. Горынин И.В., Малышевский А.В., Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Банных О.А., Блинов В.М., Костина М.В. Коррозионно-стойкие высокопрочные азотистые стали // Вопросы материаловедения. 2009. № 3. С. 7–16.
14. Малышевский В.А., Калинин Г.Ю., Харьков А.А. Создание высокопрочных корпусных сталей – от первых экспериментов до наших дней // Вопросы материаловедения. 2011. № 1. С. 17–27.
15. Сагарадзе В.В., Печеркина Н.Л., Завалишин В.А., Филиппов Ю.И., Мушникова С.Ю., Калинин Г.Ю. Влияние скорости охлаждения в интервале 1100–800°C на механические свойства и структуру азотсодержащей аустенитной стали // Вопросы материаловедения. 2011. № 3. С. 5–12.
16. Мушникова С.Ю., Сагарадзе В.В., Филиппов Ю.И., Катаева Н.В., Завалишин В.А., Малышевский В.А., Калинин Г.Ю., Костин С.К. Сравнительный анализ коррозионного растрескивания аустенитных сталей с разным содержанием азота в хлоридных и водородсодержащих средах // Физика металлов и металлургия. 2015. Т. 116. № 6. С. 663–672.
17. Сагарадзе В.В., Катаева Н.В., Мушникова С.Ю., Харьков О.А., Калинин Г.Ю., Ямпольский В.Д. Структурные изменения при разных способах плакирования корпусного материала азотистой нержавеющей сталью // Физика металлов и металлургия. 2014. Т. 115. № 2. С. 215–224.
18. Gavriljuk V.G., Sozinov A.L., Foct J., Petrov Ju.N., Polushkin Yu.A. Effect of nitrogen on the temperature dependence of the yield strength of austenitic steels // Acta Materialia. 1998. Vol. 46. № 4. P. 1157–1163.
19. Терещенко Н.А., Шабашов В.А., Уваров А.И. Особенности низкотемпературных фазовых превращений в азотсодержащих сталях на Cr-Mn основе // Физика металлов и металлургия. 2010. Т. 109. № 5. С. 464–473.
20. Горкунов Э.С., Путилова Е.А., Задворкин С.М., Макаров А.В., Печеркина Н.Л., Калинин Г.Ю., Мушникова С.Ю., Фомина О.В. Особенности поведения магнитных характеристик перспективных азотсодержащих сталей при упругопластической деформации // Физика металлов и металлургия. 2015. Т. 116. № 8. С. 884–896.
21. Линдеров М., Зегель К., Виноградов А., Вайднер А., Бирман Х. Особенности деформации ТРИП/ТВИП сталей при различных температурах по данным акустической эмиссии // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2013. № 3. С. 208–212.
22. Pierce D.T., Jiménez J.A., Bentley J., Raabe D., Wittig J.E. The influence of stacking fault energy on the microstructural and strain-hardening evolution of Fe–Mn–Al–Si steels during tensile deformation // Acta Materialia. 2015. Vol. 100. P. 178–190.
23. Mosecker L., Pierce D.T., Schwedt A., Beighmohamadi M., Mayer J., Bleck W., Wittig J.E. Temperature effect on deformation mechanisms and mechanical properties of a high manganese C+N alloyed austenitic stainless steel // Materials Science and Engineering A. 2015. Vol. 642. P. 71–83.
24. Фрактография и атлас фрактограмм / под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982. 489 с.

#### REFERENCES

1. Blinov V.M., Bannykh O.A., Poymenov I.L., Rashev Ts.V., Andreev Ch.A., Saryivanov L.A. Wear-resistance of high-nitrogen nonmagnetic chrome-manganese steels. *Metally*, 1982, no. 6, pp. 142–145.
2. Korshunov L.G., Tereshchenko N.A., Uvarov A.I., Makarov A.V., Chernenko N.I., Goikhenberg Yu.N. Wear resistance and surface of nitrogen-containing stainless austenitic steels upon friction and abrasive wear. *The physics of metals and metallography*, 1997, vol. 84, no. 5, pp. 554–561.
3. Gavriljuk V.G., Berns H. *High nitrogen steel: structure, properties, manufacture, applications*. Berlin, Springer, 1999. 378 p.
4. Kostina M.V., Bannykh O.A., Blinov V.M. Special features of steels alloyed with nitrogen. *Metal science and heat treatment*, 2000, no. 11-12, pp. 459–462.
5. Bannykh O.A. Economical stainless nitrogen steels: promising substitutes of light alloys. *Metal science and heat treatment*, 2005, no. 7, pp. 261–265.
6. Berezovskaya V.V., Bannykh O.A., Kostina M.V., Blinov E.V., Shestakov A.I., Savrai R.A. Effect of heat treatment on the structure and properties of a high-nitrogen austenitic corrosion-resistant 03Kh20AG11N7M2 steel. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2010, no. 3, pp. 183–192.
7. Berezovskaya V.V., Savrai R.A., Merkushev E.A., Makarov A.V. Structure and mechanical and corrosion properties of new high-nitrogen CR-MN steels containing molybdenum. *Russian metallurgy (Metally)*, 2012, no. 5, pp. 380–388.
8. Gorkunov E.S., Makarov A.V., Zadorkin S.M., Osintseva A.L., Mitropolskaya S.Yu., Burov S.V., Savray R.A., Rogovaya S.A., Rashev Ts.V., Zhekova L. Electromagnetic inspection of phase composition, hardness and wear-resistance of high-nitrogen stainless steels. *Defektoskopiya*, 2012, no. 12, pp. 19–30.
9. Gorynin I.V., Rybin V.V., Malyshevskiy V.A., Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu., Malakhov N.V., Yampol'skiy V.D. Development of promising funda-

- mentally new corrosion-resistant hull steel, alloyed by nitrogen. *Voprosy materialovedeniya*, 2005, no. 2, pp. 40–54.
10. Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V. Analyses of the evolution of the structure of nitrous corrosion-resistant austenitic steel 06X21AГ10H7MФБ under the thermal deformation and thermal influence. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1, pp. 9–19.
  11. Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu., Nesterova E.V., Fomina O.V., Kharkov A.A. Studies of structure and properties of high-strength corrosion-resistant nitrogen-bearing steel. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1, pp. 45–53.
  12. Sagaradze V.V., Uvarov A.I., Pecherkina N.L., Malyshevskii V.A., Kalinin G.Yu., Yampol'skii V.D. Structure and mechanical properties of the nitrogen-containing austenitic plate steel 04KH20N6G11AM2BF. *The physics of metals and metallography*, 2006, vol. 102, no. 2, pp. 233–239.
  13. Gorynin I.V., Malyshevsky V.A., Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu., Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostin M.V. Corrosion-resistant high-strength nitrous steels. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, no. 3, pp. 7–16.
  14. Malyshevsky V.A., Kalinin G.Yu., Kharkov A.A. Development of high-strength structural steels – since the first experiments up to now. *Voprosy materialovedeniya*, 2011, no. 1, pp. 17–27.
  15. Sagaradze V.V., Pecherkina N.L., Zavalishin V.A., Filippov Yu.I., Mushnikova S.Yu., Kalinin G.Yu. The influence of cooling rate in the interval 1100–800°C on mechanical properties and structure of nitrogen austenite steel. *Voprosy materialovedeniya*, 2011, no. 3, pp. 5–12.
  16. Mushnikova S.Yu., Malyshevskii V.A., Kalinin G.Y., Kostin S.K., Sagaradze V.V., Lillipov Y.I., Kataeva N.V., Zavalishin V.A. Comparative analysis of corrosion cracking of austenitic steels with different contents of nitrogen in chloride- and hydrogen-containing media. *The physics of metals and metallography*, 2015, vol. 116, no. 6, pp. 626–635.
  17. Sagaradze V.V., Kataeva N.V., Mushnikova S.Y., Khar'kov O.A., Kalinin G.Y., Yampol'skii V.D. Structural transformations in hull material clad by nitrogen stainless steel using various methods. *The physics of metals and metallography*, 2014, vol. 115, no. 2, pp. 202–210.
  18. Gavriljuk V.G., Sozinov A.L., Foct J., Petrov Ju.N., Polushkin Yu.A. Effect of nitrogen on the temperature dependence of the yield strength of austenitic steels. *Acta Materialia*, 1998, vol. 46, no. 4, pp. 1157–1163.
  19. Tereshchenko N.A., Shabashov V.A., Uvarov A.I. Specific features of low-temperature phase transformations in nitrogen-containing CR-MN-based steels. *The physics of metals and metallography*, 2010, vol. 109, no. 5, pp. 427–437.
  20. Gorkunov E.S., Putilova E.A., Zadvorkin S.M., Makarov A.V., Pecherkina N.L., Kalinin G.Y., Mushnikova S.Y., Fomina O.V. Behavior of magnetic characteristics in promising nitrogen-containing steels upon elastoplastic deformation. *The physics of metals and metallography*, 2015, vol. 116, no. 8, pp. 838–849.
  21. Linderov M., Segel C., Vinogradov A., Weidner A., Biermann H. Effect of temperature on microstructure evolution in TRIP/TWIP steels during tensile deformation by acoustic emission data. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 208–212.
  22. Pierce D.T., Jiménez J.A., Bentley J., Raabe D., Wittig J.E. The influence of stacking fault energy on the microstructural and strain-hardening evolution of Fe–Mn–Al–Si steels during tensile deformation. *Acta Materialia*, 2015, vol. 100, pp. 178–190.
  23. Mosecker L., Pierce D.T., Schwedt A., Beighmohamadi M., Mayer J., Bleck W., Wittig J.E. Temperature effect on deformation mechanisms and mechanical properties of a high manganese C+N alloyed austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 2015, vol. 642, pp. 71–83.
  24. Fellouse J., ed. *Fraktografiya i atlas fraktogramm* [Fractography and Atlas of Fractographs]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 489 p.

**MECHANICAL CHARACTERISTICS OF NITROGEN-CONTAINING AUSTENITIC 04KH20N6G11M2AFB STEEL UNDER STATIC TENSION AT TEMPERATURES FROM  $-70$  TO  $+140$  °C**

© 2015

**R.A. Savrai**, PhD (Engineering), Head of laboratory of structural material science  
*Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
**A.V. Makarov**, Doctor of Sciences (Engineering), Head of Department of material science,  
Head of Laboratory of mechanical  
*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
**E.S. Gorkunov**, Academician of RAS, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, chief researcher  
*Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
**N.L. Pecherkina**, senior researcher  
*M.N. Mikheev Institute of Metal Physics Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
**S.A. Rogovaya**, junior researcher  
**A.L. Osintseva**, PhD (Engineer), senior researcher  
*Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg (Russia)*  
**G.Yu. Kalinin**, PhD (Engineering), Head of Laboratory  
**S.Yu. Mushnikova**, PhD (Engineering), Head of sector  
*Central Research Institute of Structural Materials "Prometey", Saint Petersburg (Russia)*

*Keywords:* high-nitrogen stainless steel, microstructure, static tension, mechanical properties, fractography.

*Abstract:* The high values of strength, plasticity, corrosion resistance and tribological properties of austenitic steels of various alloying systems can be reached by alloying of the steels by nitrogen. The danger of brittle fracture of metal products and constructions under different types of volume and contact loading significantly increases during their use in the conditions of low temperatures. However to date so close attention, as to studying mechanical properties of nitrogen-containing steels at the room temperature, was not paid to complex studying of mechanical characteristics (including plasticity, toughness, crack resistance) at negative test temperatures.

The present study comprehensively investigates mechanical properties, fractographic fracture features and microstructural evolution of corrosion-resistant nitrogen-containing 04Kh20N6G11M2AFB steel (with 0.47 wt. % of N) under tensile tests at temperatures from  $-70$  to  $+140$  °C. We found the new effect of more intensive growth of strength characteristics of 04Kh20N6G11M2AFB steel with a simultaneous growth of plasticity characteristics in the conditions of tensile testing when lowering test temperature over the range from  $+50$  to  $-70$  °C compared to strengthening rate and plasticity characteristics obtained at higher test temperatures (over the range from  $+140$  to  $+50$  °C). The 04Kh20N6G11M2AFB steel preserves predominantly ductile fracture mode when lowering tensile tests temperature up to  $-70$  °C, which corresponds to the lower bound of the range of negative environmental temperatures.