

ВЛИЯНИЕ АЗОТА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

А.Н. Мазничевский^{1, 2}, Ю.Н. Гойхенберг², Р.В. Сприкут¹, Е.С. Савушкина^{1, 2}

¹ ООО «Ласмет», г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Изучено влияние азота (до 0,30 мас. %) на макроструктуру, механические свойства и технологическую пластичность хромоникельмарганцевой стали в сравнении с низкоуглеродистой аустенитной хромоникелевой сталью 03X18H11. Изучение макроструктуры слитков опытных сталей в продольном и поперечном направлении показало изменение механизма кристаллизации металла. Добавка азота приводит к уменьшению ширины столбчатых и увеличению зоны равноосных кристаллов, а также вызывает измельчение зерна и уменьшение усадочной рыхлости при одинаковых условиях кристаллизации и охлаждения слитка. Показано, что увеличение концентрации азота в стали приводит к существенному возрастанию прочностных свойств (на 30–60 %) стали при практически неизменной пластичности металла в условиях испытаний при комнатной температуре. С увеличением температуры испытаний происходит постепенное выравнивание прочностных свойств азотистой стали и 03X18H11. Наряду с этим обнаружено существенное уменьшение технологической пластичности (~ в 1,5–2,0 раза) азотистой стали при температурах горячей деформации аустенитных сталей. Данное обстоятельство свидетельствует о необходимости изучения вопроса о микролегировании опытной стали бором или редкоземельными металлами для исключения больших потерь на зачистку по поверхностным дефектами в случае промышленного освоения азотистой хромоникельмарганцевой аустенитной стали. Дополнительно оценивали хладоломкость стали с азотом при отрицательных температурах вплоть до –196 °С. Установлено, что до проведения испытаний содержание альфа-фазы в металле составляло менее 1,0 %, а при исследовании разрушенных ударных образцов после испытаний на хладноломкость на поверхности излома обнаружена магнитная фаза в количестве 1,4 % при температуре испытания –100 °С и 2,2 % при температуре испытания –196 °С, что свидетельствует о деформационной природе их возникновения и объясняет снижение ударной вязкости стали с уменьшением температуры испытаний.

Ключевые слова: азот, аустенитная сталь, 03X18H11, макроструктура, механические свойства, технологическая пластичность, хладноломкость.

Введение

Важное значение в решении проблемы повышения коррозионной стойкости стали имеет тенденция к снижению концентрации углерода и отказ от применения стабилизирующих добавок, в частности титана. Однако снижение содержания углерода в сталях аустенитного класса приводит к значительному снижению уровня их прочностных свойств. В связи с этим представляется целесообразным легировать подобные стали одним азотом или в сочетании с такими элементами, как, например, ванадий, ниобий, молибден или их комбинации [1–6].

В настоящее время перспективным направлением в разработке новых высокопрочных коррозионностойких сталей (в том числе и мартенситного класса) для нагруженных деталей или изделий химической промыш-

ленности является частичная или полная замена углерода азотом [7–10].

Азотсодержащие аустенитные стали можно разделить на три основные группы:

1. *Стали с контролируемым содержанием азота.* Концентрация азота в таких сталях варьируется от 0,04 до 0,12 мас. %. К этой категории относятся хромоникелевые аустенитные стали. Такие стали нашли применение в атомной промышленности, где от них требуются повышенные механические свойства и коррозионная стойкость, но при этом концентрация азота не должна превышать определенного предела из-за опасности возникновения радиационно-индуцированного охрупчивания.

2. *Азотистые стали.* Концентрация азота в таких сталях варьируется от 0,12 до 0,40 мас. %. К этой категории относятся

хромоникельмарганцевые и хромомарганцевые аустенитные стали. Примерами сталей этой категории могут служить стали 304N, 03X17N9AM3 (316LN), ЭК177, ЭИ878 (AISI 202).

3. *Высокоазотистые стали.* Концентрация азота в таких сталях превышает предел растворимости в данной системе легирования и, как правило, для аустенитных сталей составляет свыше 0,40 мас. %. Стали этой группы характеризуются высокой прочностью, коррозионной стойкостью, часто имеют минимальное содержание никеля (т. е. имеют хромомарганцевую систему легирования), но требуют специального оборудования и сложной технологии изготовления. Они нашли применение в особо ответственных высоконагруженных изделиях, например, бандажных кольцах турбогенераторных установок или в арктическом судостроении. Примерами высокоазотистых сталей являются стали: 12X18AG19 (P900), 04X20H6Г11M2АФБ и 654SMO.

Для получения сталей со сверхравновесным содержанием азота применяют плазменно-дуговой переплав под давлением (ПДПД), электрошлаковый переплав под давлением (ЭШПД) или плавку под давлением в индукционной печи. Необходимо отметить, что производство высокоазотистых сталей требует использования специального оборудования [11–14], за счет чего увеличивается их себестоимость.

Таким образом, для получения максимальной растворимости азота при атмосферном давлении (т. е. без использования специального оборудования) предпочтительно использовать хромомарганцевую систему легирования с высокими концентрациями хрома и марганца (что пропорционально количеству усвояемого азота металлом). Однако важно отметить, что, несмотря на то, что в системе легирования Fe–Cr–Mn можно получить максимальную растворимость азота в условиях открытой выплавки, из-за высокой токсичности марганца (марганец относится ко 2-му классу опасности по ГОСТ 12.1.005–76) и взрывоопасности дисперсной марганецсодержащей пыли необходимо обеспечить печное оборудование сложными системами пылеулавливания и очистки воздуха.

Вследствие этого большое количество отечественных металлургических заводов отказываются от производства высокомарганцевых сталей. Это обстоятельство является

дополнительной предпосылкой к дальнейшим исследованиям аустенитных сталей системы легирования Fe–Cr–Ni.

Цель настоящей работы заключалась в подборе оптимального химического состава азотистой стали в системе легирования Fe–Cr–Ni–Mn, а также оценки возможности получения в условиях открытой выплавки плотного слитка и в исследовании механических и технологических свойств азотистой стали в сравнении с классическими хромоникелевыми аустенитными сталями.

Материал и методика исследования

Для решения поставленной задачи в индукционной печи были проведены фракционные плавки 03X18N11 с переменным содержанием в них азота. При введении даже относительно небольших добавок азота (свыше 0,15 мас. %) при содержании марганца в пределах 0,5–0,8 % и концентрациях хрома и никеля, соответственно 17,5 и 11,5 %, слитки оказались пораженными пузырями, возникающими при кристаллизации металла из-за снижения растворимости азота в металле с понижением температуры. При этом усвоение азота металлом, как правило, уменьшалось с увеличением присадки азотированного феррохрома и повышением содержания никеля. Был сделан вывод, что повысить растворимость азота в имеющихся условиях можно либо за счёт дальнейшего повышения содержания хрома или марганца, либо каждого из этих элементов. Опытную сталь выплавляли в открытой индукционной печи без применения специального оборудования для создания повышенного давления азота над расплавом или слитком при его последующей кристаллизации после разливки.

Химический состав металла лабораторных плавов приведен в табл. 1, а характерный вид макроструктуры слитков – на рис. 1.

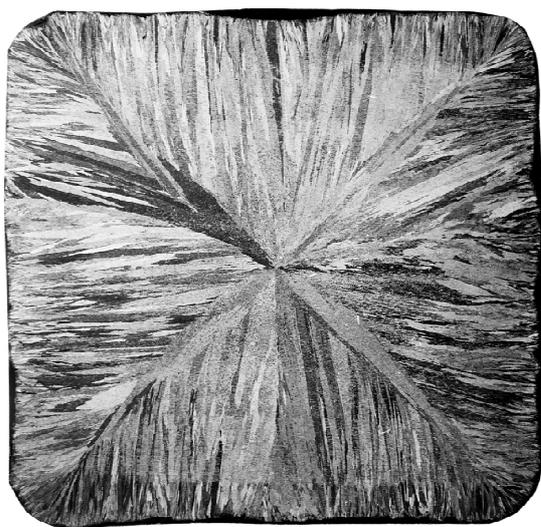
Выплавленные слитки были подвергнуты поверхностной зачистке и затем деформированы методом свободнойковки и прокатки до заготовок требуемого сечения по режимам, используемым для деформации нержавеющей аустенитных марок стали с охлаждением металла на воздухе.

Исследование макроструктуры исследуемых сталей проводили в литом состоянии. Отбор проб (темплетов) проводили из подприбыльной части слитка, а также один слиток разрезали в продольном направлении.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

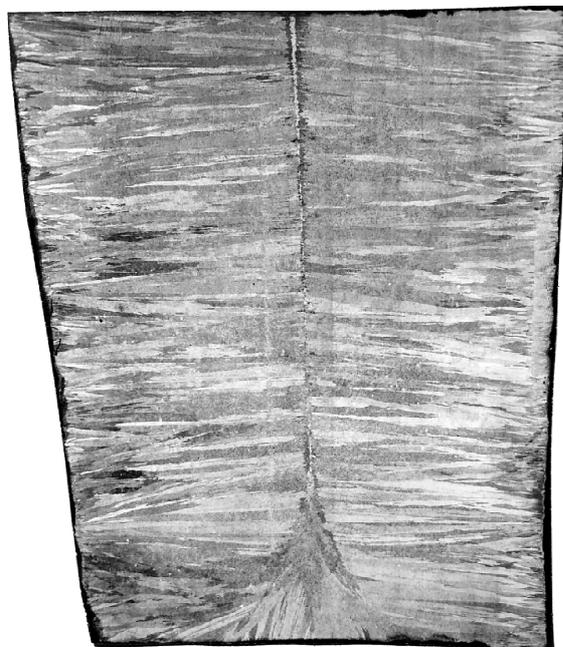
Марка	Химический состав, мас. %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	N ₂	Ti
03X18H11	0,024	0,65	0,95	0,007	0,012	18,34	11,07	0,05	0,002
04X18H11Г1А0,16	0,037	0,56	1,35	0,008	0,013	18,30	11,11	0,16	0,002
03X18H11Г1А0,16	0,022								
05X19H9Г3А0,21	0,052	0,47	2,95	0,008	0,010	19,62	9,65	0,21	0,003
03X20H9Г3А0,27	0,025					20,30		0,27	
06X19H9Г3А0,23	0,060	0,41	3,02	0,014	0,008	19,63	9,60	0,23	0,003
03X20H9Г3А0,30	0,025	0,30				20,26		0,30	



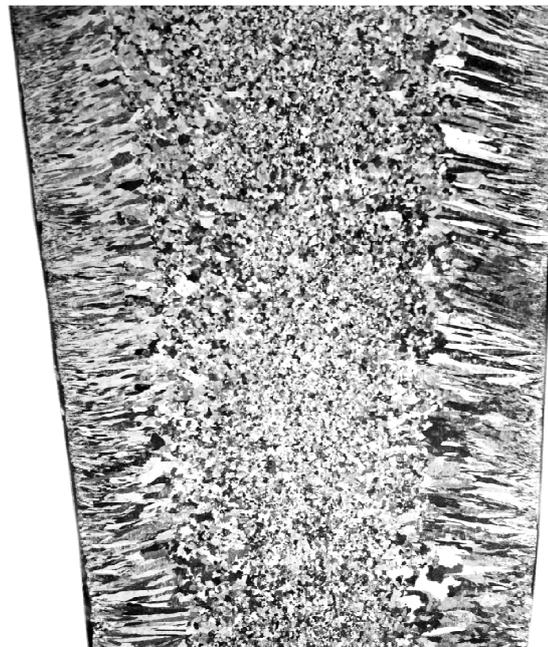
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Макроструктура литого металла: а – поперечный темплет стали 03X18H11 (0,05 % N); б – продольный темплет стали 03X18H11 (0,05 % N); в – поперечный темплет стали 03X20H9Г3А0,30 (0,30 % N); г – продольный темплет стали 03X20H9Г3А0,30 (0,30 % N)

Металловедение и термическая обработка

Пробоподготовку темплетов проводили по ГОСТ 10243–75, а затем травили в реактиве: 2 л соляной кислоты (по ГОСТ 3118–77) + 0,5 л азотной кислоты (по ГОСТ 4461–77).

Испытания на одноосное растяжение проводили на универсальных машинах для статических испытаний марок ИР 5082 и INSTRON при температуре 20 °С на образцах тип III № 7 согласно ГОСТ 1497–84, а при повышенных температурах – на образцах тип II № 1 по ГОСТ 9651–84.

Испытания на ударный изгиб проводили при комнатной, повышенных (до 1280 °С) и пониженных температурах (до –100 °С) согласно ГОСТ 9454–78, а при температурах от –100 до –196 °С – по ГОСТ 22848–77.

Пластометрические испытания проводили на пластометре с отделяемым кулачком конструкции НИИМ (г. Челябинск) при различных скоростях деформации от 1 до 30 с⁻¹ в широком интервале температур от 800 до 1300 °С. Максимальное усилие деформации – 6 т, максимальный рабочий ход ~ 45 мм. Нагрев образцов перед испытаниями и само испытание проводится в селитровой печи с карборундовыми нагревателями.

Результаты исследования и их обсуждение

Как видно из сопоставления рис. 1а, б и рис. 1в, г, добавка азота приводит к уменьшению ширины столбчатых и увеличению зоны равноосных кристаллов, а также вызывает измельчение зерна и уменьшение усадочной рыхлости при одинаковых условиях кристаллизации и охлаждения слитка.

Анализ механических свойств стали при комнатной температуре показал, что легирование азотом привело к существенному возрастанию уровня прочностных свойств при достаточно высоких значениях пластических свойств (табл. 2).

Так, например, значения предела текучести во всех образцах у сталей с содержанием азота свыше 0,20 мас. % не опускались ниже 350 МПа, доходя в отдельных фракциях до 410 МПа (03X20H9Г3A0,27), что примерно на 50–70 % выше по сравнению со сталью 03X18H11 без азота и на 10–25 % выше аналогичных азотсодержащих сталей: 03X17AH9 (ЭК177), 10X14AG15 (ДИ13), 03X17H9AM3 (АISI 316LN), 12X17Г9АН4 (ЭИ878).

Оценку стойкости стали к хладноломкости проводили путем построения сериальных

Таблица 2

Механические свойства исследуемых сталей

Марка	Механические свойства при +20 °С							
	σ_B		σ_T		δ		ψ	
	МПа	Δ	МПа	Δ	%	Δ	%	Δ
Вариант А: т/о: закалка 1050 °С, 30 мин, вода								
03X18H11	560	–	270	–	59,0	–	75,0	–
04X18H11Г1A0,16	674	+20,4 %	324	+20,0 %	46,5	–12,5 %	76,0	+1,0 %
03X18H11Г1A0,16	651	+16,3 %	303	+12,2 %	50,6	–8,4 %	73,4	–1,6 %
05X19H9Г3A0,21	726	+29,6 %	386	+43,0 %	46,8	–12,2 %	76,0	+1,0 %
03X20H9Г3A0,27	756	+35,0 %	392	+45,2 %	45,0	–14,0 %	74,1	–0,9 %
06X19H9Г3A0,23	746	+33,2 %	351	+30,0 %	54,6	–4,4 %	74,5	–0,5 %
03X20H9Г3A0,30	777	+38,8 %	412	+52,6 %	47,1	–11,9 %	72,5	–2,5 %
Вариант Б: т/о: закалка 1100 °С, 30 мин, вода								
03X18H11	545	–	245	–	60,5	–	75,0	–
04X18H11Г1A0,16	635	+16,5 %	298	+21,6 %	51,6	–8,9 %	75,5	+0,5 %
03X18H11Г1A0,16	639	+17,3 %	316	+29,0 %	52,5	–8,0 %	75,7	+0,7 %
05X19H9Г3A0,21	725	+33,0 %	375	+53,1 %	48,0	–12,5 %	74,3	–0,7 %
03X20H9Г3A0,27	753	+38,2 %	410	+67,4 %	46,6	–13,9 %	72,8	–2,2 %
06X19H9Г3A0,23	721	+32,3 %	363	+48,2 %	57,1	–3,4 %	73,2	–1,8 %
03X20H9Г3A0,30	744	+36,5 %	382	+55,9 %	50,1	–10,4 %	74,6	–0,4 %

Примечание. Δ – означает прирост/убыль характеристики по сравнению с 03X18H11.

кривых в интервале от $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты испытаний показаны на рис. 2.

Важно отметить, что при исследовании разрушенных ударных образцов на наличие альфа-фазы после испытаний на хладноломкость показало появление на поверхности излома магнитной фазы в количестве 1,4 % при температуре испытания $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 2,2 % при температуре испытания $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о деформационной природе их возникновения и объясняет снижение ударной вязкости стали с уменьшением температуры испытаний. До проведения испытаний хладноломкости содержание альфа-фазы в металле составляло менее 1,0 %.

Для определения технологической пластичности сталей были проведены испытания на горячий разрыв в интервале температур $300\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3), ударный изгиб в интервале температур $1100\text{--}1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4а), и горячее скручивание при температурах $900\text{--}1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4б). Результаты испытаний на горячий разрыв показали возрастание прочностных свойств у стали, легированной азотом, при одновременном снижении её пластичности (см. рис. 3).

Следует отметить, что все ударные об-

разцы (см. рис. 4а) в процессе испытаний на ударный изгиб (в интервале температур $1100\text{--}1280\text{ }^{\circ}\text{C}$) только согнулись (без образования трещин), но не разрушились.

Снижение азотом технологической пластичности (рис. 3б) стали 03X20N9Г3А0,30 (по сравнению с 03X18Н11) подтверждается также результатами испытаний на горячее скручивание (см. рис. 4б).

«Провалы» на кривой пластичности в интервале температур $700\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$, отмеченные при испытаниях на горячий разрыв (см. рис. 3б), связаны с процессами выделения избыточных фаз по границам зерен. Для исключения фактора предварительной пластической деформации на структурные изменения, происходящие при пластической деформации литой структуры, дополнительно исследовали горячую пластичность стали 03X20N9Г3А0,30 в литом состоянии.

Внешний вид образцов после проведения испытаний на горячий разрыв показан на рис. 5. Из сопоставления образцов разных аустенитных сталей видно, что самой худшей пластичностью обладает 12X18Н10Т, затем 03X20N9Г3А0,30, а наилучшая пластичность у 03X18Н11.

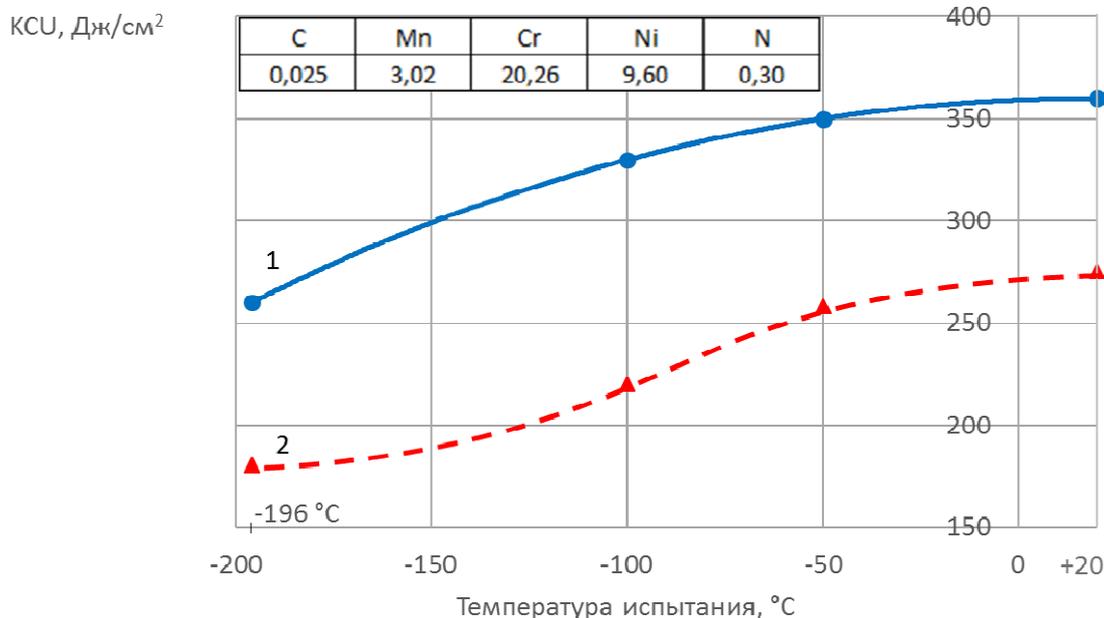


Рис. 2. Склонность стали 03X20N9Г3А0,30 к хладноломкости: 1 – продольно вырезанные образцы; 2 – поперечно вырезанные образцы

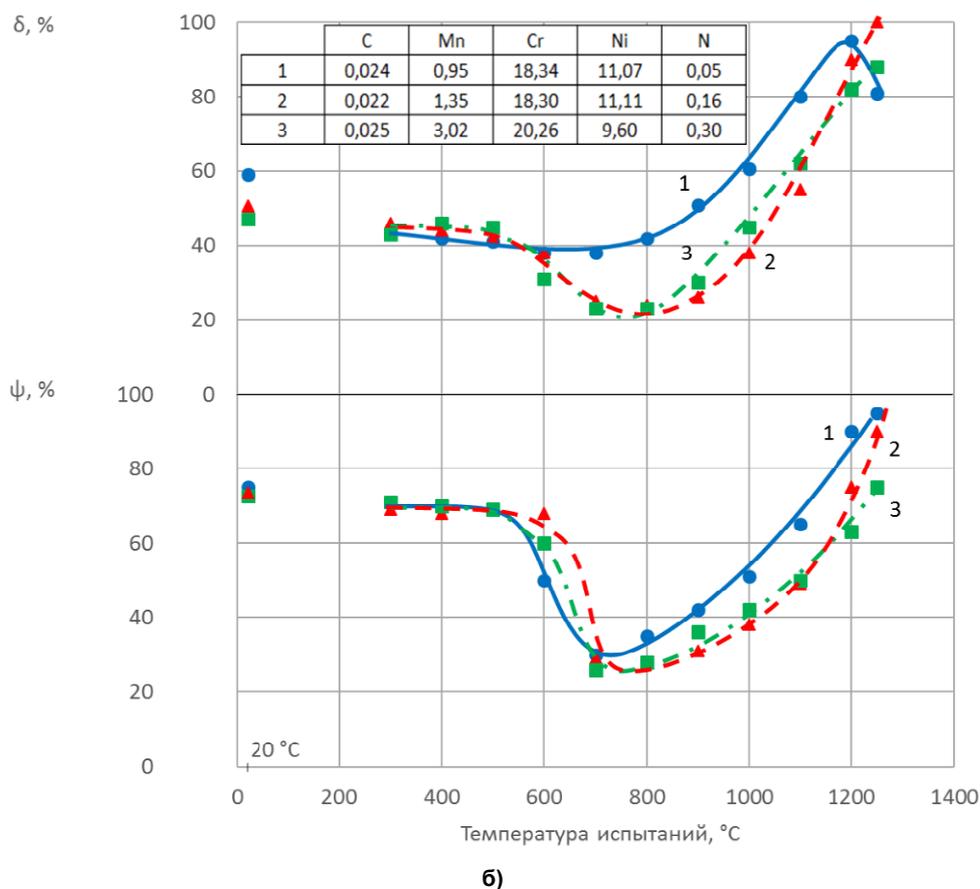
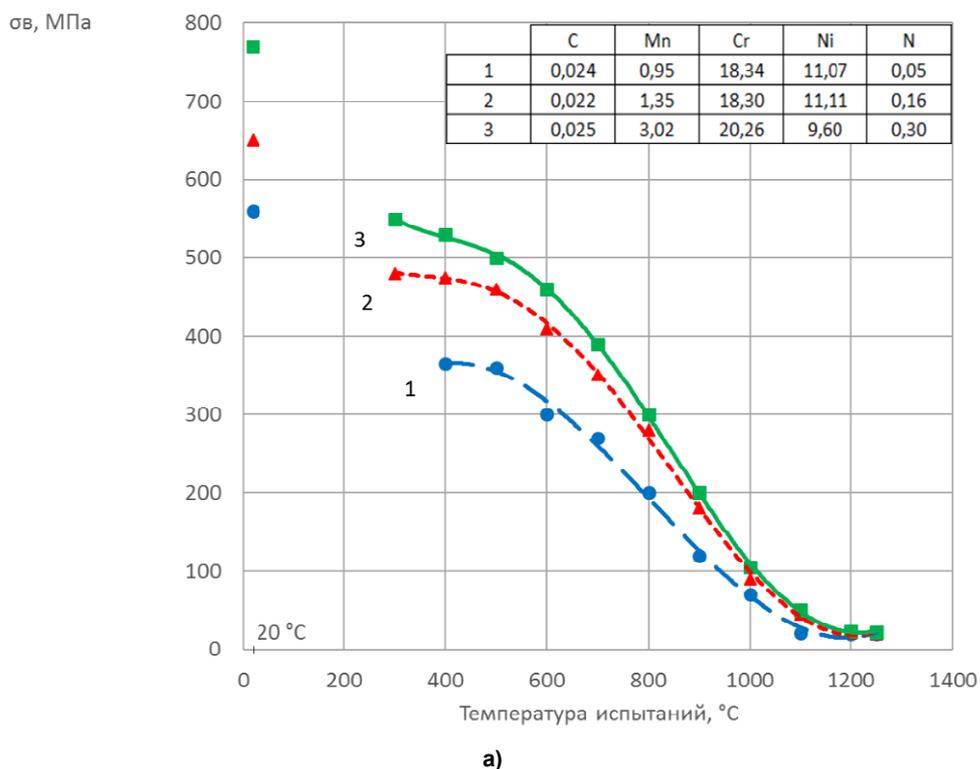
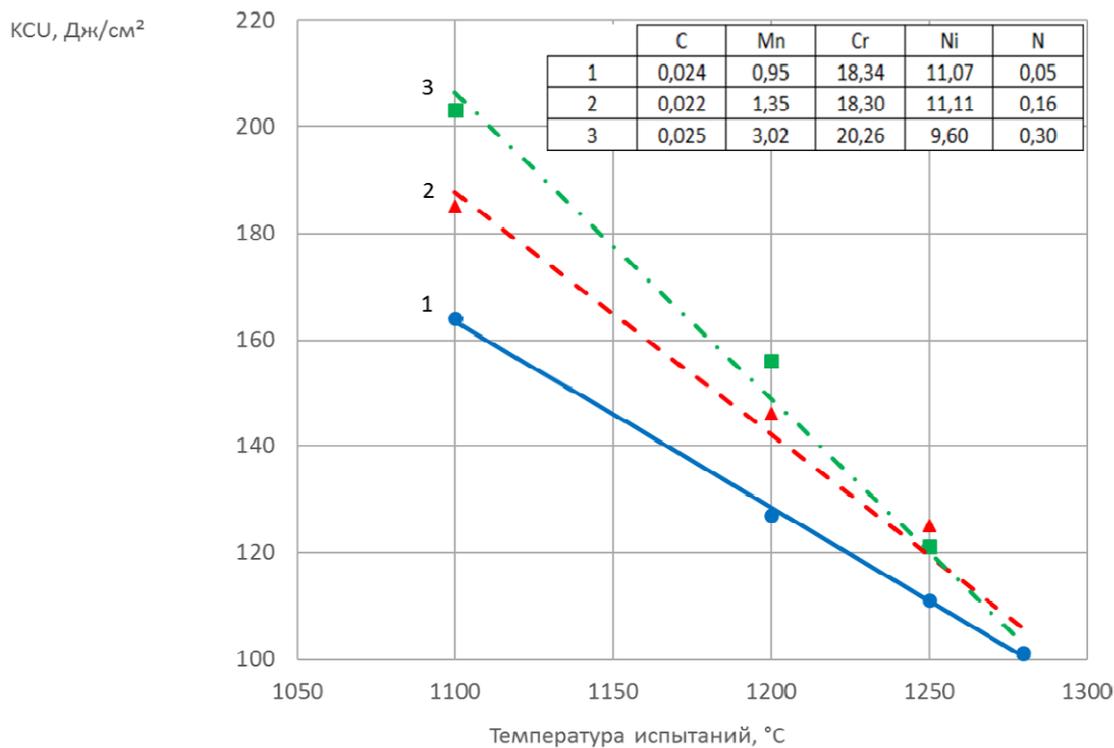
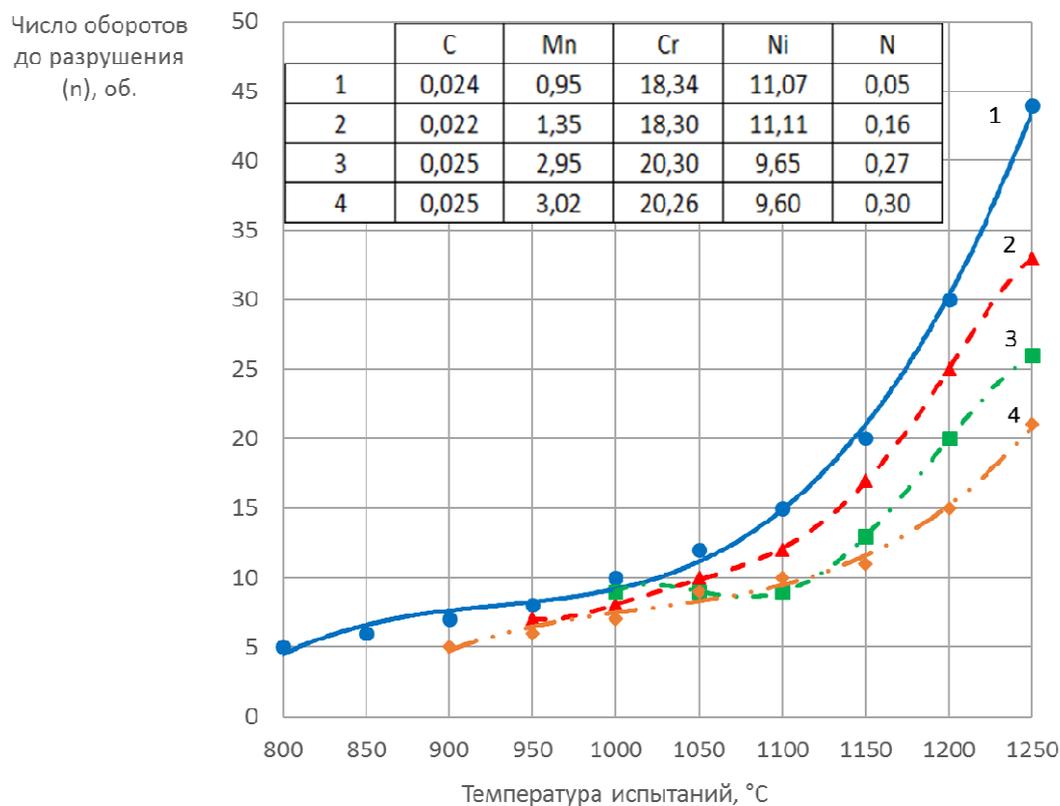


Рис. 3. Влияние содержания азота на технологическую пластичность нержавеющей стали в интервале температур 300–1250 °С: а – сопротивление деформации (σ_в, МПа); б – пластические свойства (δ, %; ψ, %). 1 – 03X18H11; 2 – 03X18H11Г1А0,16; 3 – 03X20H9Г3А0,30



а)



б)

Рис. 4. Влияние содержания азота на технологическую пластичность, исследованную методами: горячего ударного изгиба (а) и методом горячего скручивания (б) исследуемых сталей: 1 – 03X18H11; 2 – 03X18H11Г1А0,16; 3 – 03X20H9Г3А0,27; 4 – 03X20H9Г3А0,30

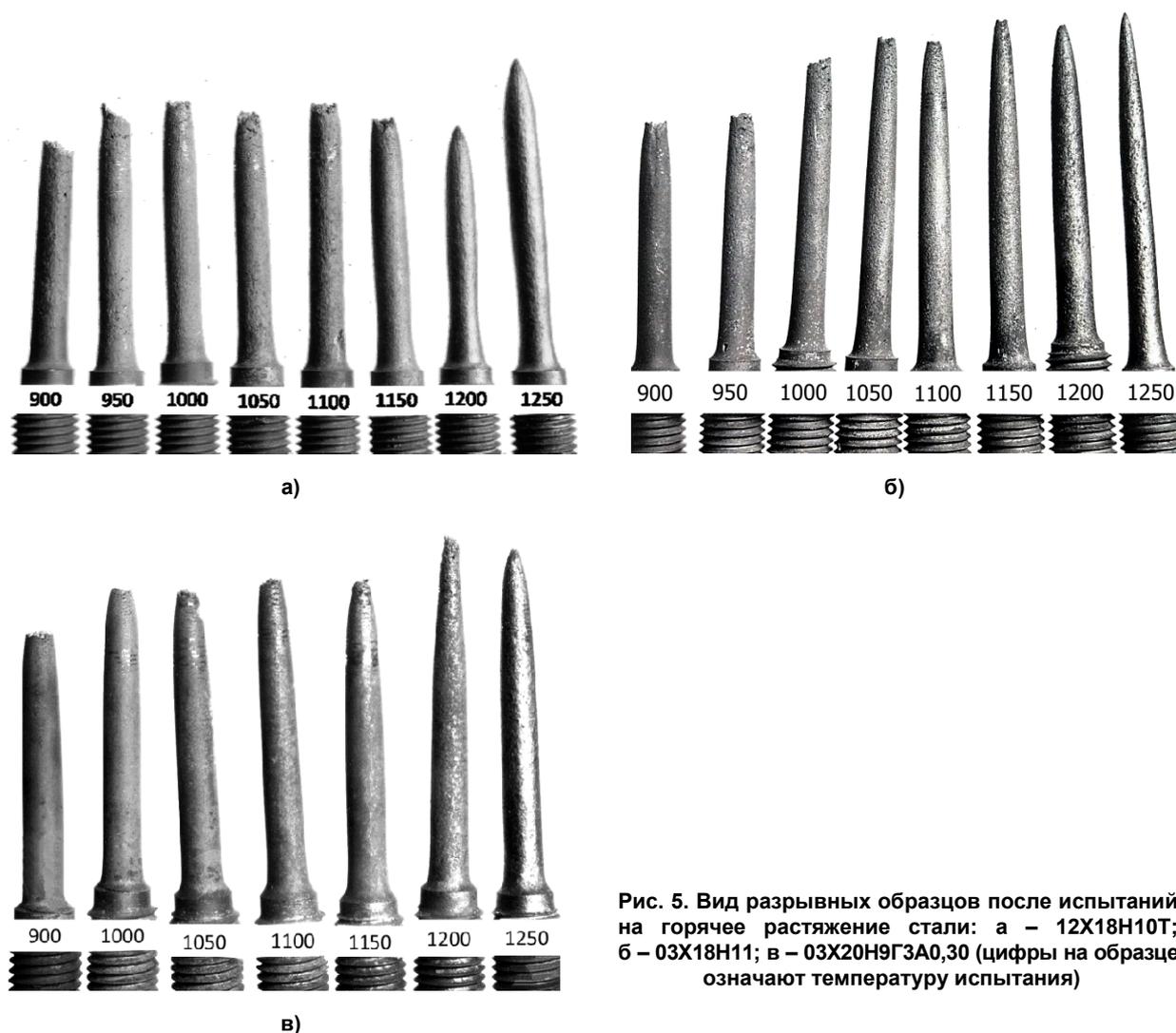


Рис. 5. Вид разрывных образцов после испытаний на горячее растяжение стали: а – 12Х18Н10Т; б – 03Х18Н11; в – 03Х20Н9Г3А0,30 (цифры на образце означают температуру испытания)

Заключение

Полученные результаты исследований показывают, что азот улучшает макроструктуру литого металла, а также, с одной стороны, значительно улучшает прочностные свойства (на 30–60 %), оставляя практически без изменения пластичность стали при комнатной температуре, а с другой стороны, значительно снижает технологическую пластичность аустенитных хромоникельмарганцевых сталей. Анализ полученных результатов свидетельствует, что для обеспечения высокой технологичности азотистой стали, не уступающей безазотистым сталям, при её производстве необходимо использовать микролегирование бором или редкоземельными металлами.

По данному направлению проводятся дополнительные исследования.

Литература

1. Feichtinger, H.K. Melting of high nitrogen steels / H.K. Feichtinger, G. Stein // *High Nitrogen Steels'98*. – Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 1998. – P. 261–270. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.318-320.261
2. Gavriljuk, V. High Nitrogen Steels / V. Gavriljuk, H. Berns. – Berlin: Springer, 1999 – 378 p.
3. О влиянии легирования на предельную растворимость азота в коррозионностойких низкоуглеродистых сплавах Fe–Cr–Mn–Ni–Mo / В.М. Блинов и др. // *Металлы*. – 2004. – № 4. – С. 42–49.
4. Коррозионностойкие высокопрочные азотистые стали / И.В. Горынин и др. // *Вопросы материаловедения*. – 2009. – № 3 (59). – С. 7–16.
5. Легирование стали азотом / Л.Г. Риги-

на и др. // *Электрометаллургия*. – 2005. – № 2. – С. 14–21.

6. Siwka, J. *Equilibrium constants and nitrogen activity in liquid metals and iron alloys* / J. Siwka // *Czestochowa University of Technology*. – 2008. – No. 4. – P. 385–394. DOI: 10.2355/isijinternational.48.385

7. Братухин, А.Г. *Технологическое обеспечение высокого качества, надежности, ресурса авиационной техники* / А.Г. Братухин. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 524 с.

8. Влияние азота на коррозионные и коррозионно-механические свойства стали со структурой азотистого мартенсита / В.М. Блинов и др. // *Металлы*. – 2003. – № 4. – С. 84–92.

9. Гаврилюк, В.Г. *Углерод, азот и водород в сталях: пластичность и хрупкость* / В.Г. Гаврилюк // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2015. – Т. 58, № 10. – С. 761–768.

10. *О возможностях использования сталей со структурой азотистого мартенсита*

для сварных конструкций, работающих при низких температурах / М.В. Костина и др. // *Прочность материалов и конструкций при низких температурах: сб. тр. семинара (VII науч.-техн. конф.)*. – СПб. – 2002. – С. 26–31.

11. Фельдгандлер, Э.Г. *Азот в коррозионно-стойких сталях* / Э.Г. Фельдгандлер, Л.Я. Савкина // *Черная металлургия*. – 1990. – № 11 (1099). – С. 24–34.

12. Рашев, Ц. *Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением* / Ц. Рашев. – София: Изд-во БАН «Проф. Марин Дринов», 1995. – 268 с.

13. Свяжин, А.Г. *Стали, легированные азотом* / А.Г. Свяжин, Л.М. Капуткина // *Известия вузов. Черная металлургия*. – 2005. – № 10. – С. 36–46.

14. Мурадян, О.С. *Опыт выплавки высокоазотистых немагнитных коррозионно-стойких сталей* / О.С. Мурадян, И.А. Галикеев // *Черные металлы*. – 2013. – № 5. – С. 10–13.

Мазничевский Александр Николаевич, ведущий научный сотрудник, ООО «Ласмет» (Лаборатория специальной металлургии); аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; chiefteh@lasmet.ru.

Гойхенберг Юрий Нафтулович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; goikhenbergyn@susu.ru.

Сприкут Радий Вадимович, директор, ООО «Ласмет» (Лаборатория специальной металлургии), г. Челябинск; mail@lasmet.ru.

Савушкина Евгения Сергеевна, инженер-металловед, ООО «Ласмет» (Лаборатория специальной металлургии); аспирант кафедры материаловедения и физико-химии материалов, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vasyukova_es@mail.ru.

Поступила в редакцию 23 апреля 2019 г.

INFLUENCE OF NITROGEN ON MECHANICAL PROPERTIES AND TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF AUSTENITIC STEEL

A.N. Maznichenkov^{1, 2}, chiefteh@lasmet.ru,
Yu.N. Goikhenberg², goikhenbergyn@susu.ru,
R.V. Sprikut¹, mail@lasmet.ru,
E.S. Savushkina^{1, 2}, vasyukova_es@mail.ru

¹ Lasmet Co, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The effect of nitrogen (up to 0.30 wt.%) on the macrostructure, mechanical properties and technological plasticity of chromium-nickel-manganese steel in comparison with low carbon austenitic nickel-chromium steel 03CH18N11 (AISI 304L) was studied. The study of these steels ingots macrostructure in the longitudinal and transverse direction showed a change in the metal crystallization mechanism. The addition of nitrogen leads to a decrease in the width of the columnar crystals and increase the zone of equiaxed crystals. Also nitrogen causes the grain grinding and reduce shrinkage under the same conditions of crystallization and cooling of the ingot. Increase the concentration of nitrogen in steel leads to a significant steel strength properties (by 30–60 %) increase with practically unchanged ductility of the metal under the test conditions at room temperature. With an increase in the test temperature the strength properties a gradual alignment of nitrogen steel and AISI 304L occurs. Along with this, a significant decrease in technological plasticity (~ 1.5–2.0 times) of nitrogen steel was found at hot deformation temperatures of austenitic steels. This circumstance indicates the need to study the issue of microalloying with boron or rare earth metals in order to exclude large losses for stripping due to surface defects in the case of commercial development of nitrogenous chromium-nickel-manganese austenitic steel. Additionally, the cold shortness of steel with nitrogen was evaluated at negative temperatures down to –196 °C. It was established that prior to testing, the alpha-phase content in the metal was less than 1.0 %, and when examining destroyed impact specimens after testing for cold shortness, a magnetic phase was detected in the amount of 1.4% at a test temperature of –100 °C and 2,2% at the test temperature of –196 °C. These indicates that deformation nature of their occurrence and explains the decrease in the toughness of the steel with a decrease in the test temperature.

Keywords: nitrogen, austenitic steel, 304L, macrostructure, mechanical properties, technological plasticity, cold shortness.

References

1. Feichtinger H.K., Stein G. Melting of High Nitrogen Steels. *High Nitrogen Steels'98*. Switzerland, Trans Tech Publications Ltd., 1998, pp. 261–270. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.318-320.261
2. Gavriljuk V., Berns H. *High Nitrogen Steels*. Berlin, Springer, 1999. 378 p.
3. Blinov V.M. [The Effect of Alloying on Solubility of Nitrogen in the Corrosion-Resistant Low-Carbon Fe–Cr–Mn–Ni–Mo Steels]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2004, no. 4, pp. 42–49. (in Russ.)
4. Gorynin I.V. et al. [Corrosion Resistant High Strength Nitrogen Steels]. *Voprosy materialovedeniya*, 2009, no. 3 (59), pp. 7–16. (in Russ.)
5. Rigina, L.G. et al. [Alloying Steel with Nitrogen]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2005, no. 2, pp. 14–21. (in Russ.)
6. Siwka, J. Equilibrium Constants and Nitrogen Activity in Liquid Metals and Iron Alloys. *Czestochowa University of Technology*, 2008., no. 4, pp. 385–394. DOI: 10.2355/isijinternational.48.385
7. Bratukhin, A.G. *Tekhnologicheskoye obespecheniye vysokogo kachestva, nadezhnosti, resursa aviatsionnoy tekhniki* [Technological Support of High Quality, Reliability, Aviation Equipment Resource]. Moscow, Engineering Publ., 1996, vol. 1. 524 p.
8. Blinov V.M. et al. [The Effect of Nitrogen on the Corrosion and Corrosion-Mechanical Properties of Steel with the Structure of Nitrogenous Martensite]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2003, no. 4, pp. 84–92. (in Russ.)

9. Gavriljuk V.G. Influence of Interstitial Carbon, Nitrogen, and Hydrogen on the Plasticity and Brittleness of Steel. *Steel in Translation*, 2015, vol. 45, iss. 10, pp. 747–753. DOI: 10.3103/S0967091215100046
10. Kostina, M.V. [On the Possibilities of Using Steels with a Nitrogenous Martensite Structure for Welded Structures Operating at Low Temperatures]. *Proceedings of the VII Scientific and Technical Conference “Strength of Materials and Structures at Low Temperatures”*. St. Petersburg, 2002, pp. 26–31. (in Russ.)
11. Feldgandler E.G. [Nitrogen in Corrosion Resistant Steels]. *Ferrous Metallurgy*, 1990, no. 11 (1099), pp. 24–34. (in Russ.)
12. Rashev C. High-Nitrogen Steels. Pressure Metallurgy. *Journal of the Bulgarian Academy of Science*, 1995.
13. Svyazin A.G., Kaputkina L.M. [Steels with Nitrogen]. *Steel in Translation*, 2005, no. 10, pp. 36–46.
14. Muradyan O.S. [Experience of Smelting High-Nitrogen Non-Magnetic Corrosion-Resistant Steels]. *Ferrous Metallurgy*, 2013, no. 5, pp. 10–13. (in Russ.)

Received 23 April 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Влияние азота на механические свойства и технологическую пластичность аустенитной стали / А.Н. Мазничевский, Ю.Н. Гойхенберг, Р.В. Сприкут, Е.С. Савушкина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 25–35. DOI: 10.14529/met190203

FOR CITATION

Maznichevsky A.N., Goikhenberg Yu.N., Sprikut R.V., Savushkina E.S. Influence of Nitrogen on Mechanical Properties and Technological Plasticity of Austenitic Steel. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 25–35. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190203
