



## Влияние температуры закалки из межкритического интервала на характер деформационного упрочнения стали X70

В. Г. Гаврилова<sup>1)</sup>, Н. Е. Мак-Мак<sup>2)</sup>, М. А. Григорьева<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500

### Article info:

Paper received:

The final version of the paper received:

Paper accepted online:

16 November 2015

10 February 2016

25 February 2016

### Correspondent Author's Address:

<sup>2)</sup> [natkakaravaeva@ya.ru](mailto:natkakaravaeva@ya.ru)

В работе на основе анализа диаграмм растяжения образцов стали X70, предварительно нормализованных и закаленных в воде из межкритического Ac1-Ac3-интервала, рассчитаны степень упрочнения, равномерное удлинение и коэффициент упрочнения как отношение разности пределов прочности и текучести к относительному удлинению разрывных образцов на участке диаграммы растяжения, соответствующему равномерному удлинению.

Установлен характер изменения коэффициента деформационного упрочнения  $\eta^*$ . Его величина с увеличением температуры закалки из межкритического интервала повышается в  $\approx 1,8$  раза. При этом формируется смешанная структура феррито-мартенситного типа, дисперсность которой возрастает с увеличением температуры нагрева под закалку из указанного интервала.

Полученные результаты рекомендуется использовать при разработке режимов термоупрочнения малоуглеродистых, низколегированных сталей, а также при оценке показателей их технологических и служебных характеристик.

**Ключевые слова:** межкритический интервал, коэффициент упрочнения, штрипсовая сталь X70, степень упрочнения, равномерное удлинение.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Непрерывное повышение требований к сталям, применяемым для изготовления сварных газопроводных труб большого диаметра, вызывает необходимость дальнейшего совершенствования структурного состояния за счет оптимизации режимов термоупрочнения, в частности, применения закалки с нагревом в межкритический интервал температур (МКИТ), а также изучения, после указанной обработки, структурообразования и особенностей деформационного поведения применяемых для этой цели сталей.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Одним из эффективных решений получения хорошего сочетания механических свойств металлопроката из малоуглеродистых, низколегированных сталей, а также снижения энергозатрат в процессе их термообработки является упрочнение в результате закалки с нагревом в МКИТ по сравнению с технологиями, предусматривающими традиционный для данных сталей нагрев выше Ac3 [1-5, 9].

В работах [2-5, 9] рассмотрены теоретические и прикладные вопросы, касающиеся закалки из МКИТ низко- и среднеуглеродистых сталей, а также приведен анализ факторов, связанных с формированием структуры в указанной области. Уровень механических свойств трубных сталей оценивается на основании результатов испытаний с использованием раз-

личных способов нагружения, так как в процессе эксплуатации они подвергаются различного рода нагрузкам [1]. Наиболее полную информацию о свойствах металлов позволяет получить способ испытания на растяжение [1, 7]. При этом оцениваются показатели прочности ( $\sigma_T$  и  $\sigma_B$ ) и пластичности ( $\delta$  и  $\psi$ ). Дополнительную информацию, отражающую изменение характеристик металла в процессе пластической деформации при увеличении напряжения от  $\sigma_T$  до  $\sigma_B$ , позволяет получить отношение  $\sigma_T/\sigma_B$ . Такой показатель, однако, не дает представления об уровне пластичности в области однородной деформации, наблюдаемой в процессе роста напряжений в пределах между  $\sigma_T$  и  $\sigma_B$  [6].

Стандартный подход при анализе прочностных свойств малоуглеродистых, низколегированных сталей, закаленных из МКИТ, в силу неоднозначной зависимости, не позволяет в должной мере установить особенности деформационного упрочнения в интервале растягивающих напряжений  $\sigma_T \div \sigma_B$ . Наиболее приемлемой величиной в этом случае является коэффициент упрочнения, который может быть определен различными способами [6, 7]. Однако эти способы малоэффективны для расчета указанного показателя по диаграммам растяжения на участке, соответствующем равномерному удлинению образцов, закаленных из МКИТ.

### ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Установление особенностей деформационного

упрочнения при испытаниях на растяжение штрипсовой стали X70 после аустенитизации и закалки из межкритического интервала температур.

## ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Химический состав исследуемой стали приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали X70, % масс.

C	Si	Mn	Cr	Nb	V	Mo	Ti	Al	Cu	Ni	S	P	Fe
0,1	0,15÷0,50	1,7	0,2	0,03	0,08	0,1	0,035	0,05	0,35	0,2	0,006	0,02	ост.

Критические точки:  $A_{c1} = 720$  °C;  $A_{c3} = 862$  °C.

Карточки размером 200x300 мм вырезались из листового металла согласно ГОСТ 7564-97. Из них изготавливались стандартные разрывные образцы размером 19,6x37,5x125. Испытания на растяжение (ГОСТ 1497-84) проводились при комнатной температуре. Исследование микроструктуры выполнялось на металлографическом микроскопе ЕС МЕТАМ РВ-22.

Готовые образцы предварительно подвергались аустенитизации с выдержкой 25 мин и последующим охлаждением на воздухе. После этого они нагревались в межкритический ( $A_{c1}$ - $A_{c3}$ ) интервал до температур: 700, 730, 760, 790, 820 °C с такой же выдержкой и охлаждались в воде. Таким образом, нормализация от температуры 1070 °C обеспечивала относительно полное растворение карбонитридных фаз, а при последующем нагреве в интервале температур  $A_{c1}$ - $A_{c3}$  и охлаждении в воде, в исследуемой стали фиксировались различные стадии образования продуктов распада двухфазной структуры.

На рисунке 1 а представлена микроструктура стали X70 после нормализации от 1070 °C. Такая обработка обеспечила формирование структуры сорбит. Последующая закалка из МКИТ позволила создать условия для образования двухфазной структуры, дисперсность которой увеличивается с повышением температуры нагрева под закалку в МКИТ (рис. 1 б – е). Номер зерна изменялся от 5-го при температуре 730 °C (рис. 1 в) до 9-го при 830 °C (рис. 1 е).

Пластическая деформация металлов и сплавов обычно рассматривается как стадийный процесс, характеризующийся различной интенсивностью деформационного упрочнения, что обусловлено в значительной мере эволюцией дефектной структуры сплавов [7]. В связи с тем что закалка из МКИТ может показать сложную зависимость характеристик прочностных свойств, уровень деформационного упрочнения на стадии равномерной деформации можно оценить с помощью условного коэффициента упрочнения

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{в}} - \sigma_{\text{Т}}}{\Delta l}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{Т}}$ ,  $\sigma_{\text{в}}$  – характеристики прочности, МПа;  
 $\Delta l$  – удлинение образца, %.

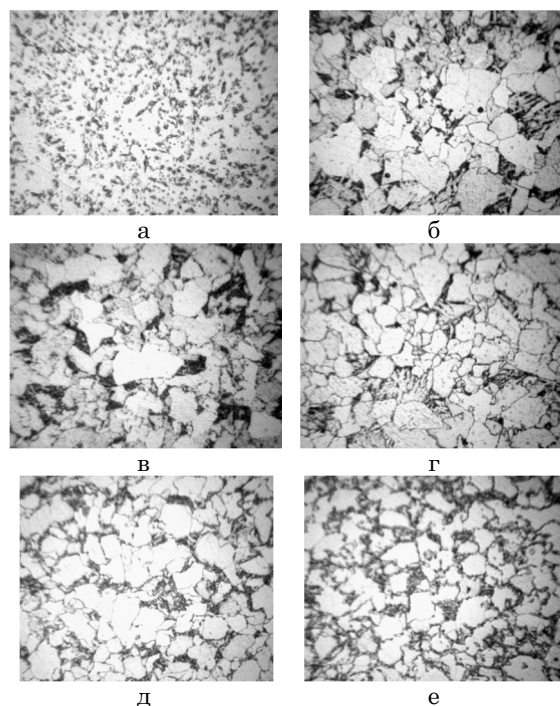


Рисунок 1 – Микроструктура стали X70 после предварительной аустенитизации и закалки от различных температур (x400): а – аустенитизация при 1070 °C (охлаждение на воздухе); закалка в воде от температур: б – 700 °C; в – 730 °C; г – 760 °C; д – 790 °C; е – 830 °C

В таблице 2 представлены усредненные результаты испытаний на растяжение образцов, закаленных из межкритического интервала (по 5 на каждую температуру), а также результаты расчетов необходимых для анализа величин. Оценка достоверности экспериментальных значений проводилась с 95 % доверительной вероятностью.

Таблица 2 – Показатели механических свойств стали X70 после закалки из МКИТ

Температура нагрева, °C	Среднее значение механических свойств			Расчетная величина		
	$\sigma_{\text{Т}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Delta\sigma$ , МПа	$(\Delta l/l_0)_p$	$\eta^*$
700	493,1	516,8	18,0	23,7	0,18	131,7
730	498,7	519,9	19,5	21,2	0,20	108,7
760	497,1	519,6	18,0	22,5	0,18	125,0
790	488,3	527,0	19,5	38,7	0,20	198,5
820	478,6	526,0	25,5	47,4	0,26	185,9

По результатам испытаний расчет средней величины коэффициента упрочнения  $\eta^*$  выполнялся путем определения отношения величины  $\Delta\sigma$  к относительному удлинению разрывных образцов на участке диаграммы растяжения, соответствующему равномерному удлинению  $(\Delta l/l_0)_p$ :

$$\eta^* = \frac{\Delta\sigma}{(\Delta l/l_0)_p}. \quad (2)$$

Эта величина определялась из диаграмм растя-

жения без зуба и площадки текучести, имеющих монотонный характер, путем деления на 100 относительного удлинения  $\delta$  на участке равномерной деформации.

Как видно из рисунка 2, повышение температуры закалки от 700 до 830 °С сопровождается противоположным изменением величин  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$ : величина  $\sigma_B$  медленно возрастает от 516,8 до 527,0 МПа, а  $\sigma_T$  относительно резко снижается от 498,7 до 478,6 МПа.

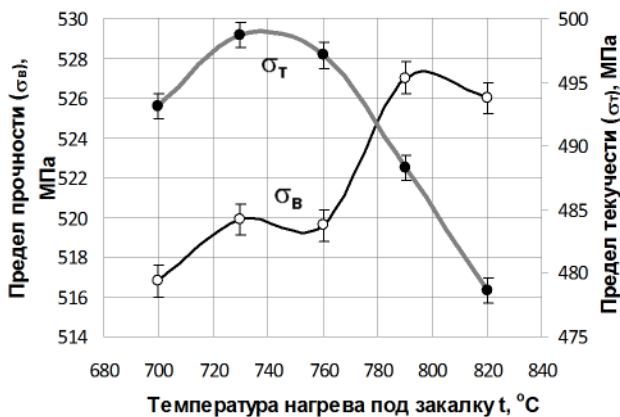
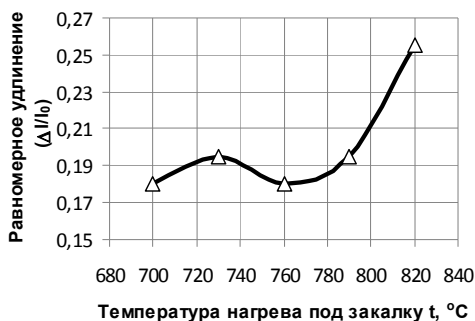
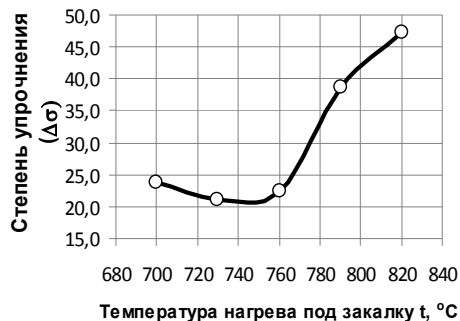


Рисунок 2 – Зависимость показателей прочности стали X70 от температуры закалки из МКИТ

Таким образом, повышение температуры закалки в МКИТ приводит к резкому увеличению разности  $\Delta\sigma = \sigma_B - \sigma_T$  (рис. 3 а) и величины равномерного удлинения  $(\Delta l/l)_p$  (рис. 3 б).



а



б

Рисунок 3 – Влияние температуры закалки из МКИТ на степень упрочнения (а) и равномерное удлинение (б) стали X70

Из результатов расчетов значений  $\eta^*$ , приведенных в таблице 2 и на рис. 4, следует, что образцы, подвергнутые предварительной нормализации от 1070 °С (исходное состояние всех образцов) и закалке от температуры  $\sim 730$  °С, характеризуются низким коэффициентом упрочнения  $\eta^* = 108,7$ .

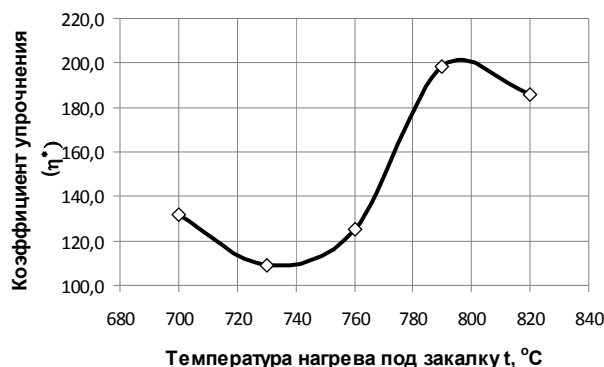


Рисунок 4 – Зависимость величины параметра упрочнения от температуры закалки из МКИТ стали X70

При повышении температуры до 730 °С величина  $\eta$  снижается до 110,0, а затем возрастает до максимального значения – 199,5. Имеются данные [2], что при нагреве в межкритический интервал происходит рафинирование феррита по примесям (они уходят в аустенит), этот фактор делает феррит пластичным. Получение двухфазной структуры низкоуглеродистой стали после закалки из МКИТ, состоящей из рафинированного феррита и островков мартенсита в тройных стыках зерен, предопределяет низкие значения предела текучести при высоких значениях временного сопротивления.

Низкие значения коэффициента  $\eta^*$  определяют пластичность листовых малоуглеродистых сталей. Рост коэффициента  $\eta^*$  может быть связан с формированием при температурах в верхней части МКИТ большого количества дисперсных зерен аустенита и, как следствие, измельчением мартенситных пакетов, а также наличием в мартенсите диффузионно активных атомов углерода, блокирующих источники дислокаций [8, 9].

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что повышение температуры закалки от 700 до 830 °С предварительно нормализованных образцов сопровождается противоположным изменением величин  $\sigma_B$  и  $\sigma_T$ ; при этом наблюдается измельчение структуры смешанного, феррито-мартенситного типа.

2. Показано, что в случае неоднозначного изменения показателей прочности образцов стали X70, закаленных из межкритического  $A_{c1}$ - $A_{c3}$ -интервала температур и испытанных на растяжение, для оценки характера деформационного упрочнения может быть применен коэффициент  $\eta^*$ .

3. Повышение температуры нагрева под закалку из МКИТ приводит к резкому увеличению разности показателей  $\sigma_B - \sigma_T$  и величины равномерного удлинения  $(\Delta l/l)_p$ , при этом коэффициент упрочнения  $\eta^*$  повышается  $\approx$  в 1,8 раза.

# Influence of quenching temperature from the intercritical interval on the character of X70 steel strain hardening

V. G. Gavrylova<sup>1)</sup>, N. E. Mak-Mak<sup>2)</sup>, M. A. Grigoreva<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> Priazovskyi state technical university, 7, Universytets'ka Str., Mariupol, Ukraine, 87500

The article presents the analysis of the diagrams of X70 steel tension, previously normalized and quenched in water from intercritical A1-A3 interval, there were calculated the degree of hardening, evenly elongation and hardening coefficient as the ratio of the difference between the tensile strength and yield strength to the elongation of samples on the diagram tension sector, that corresponds to the evenly elongation.

The nature of strain hardening coefficient  $\eta^*$  change is determined. Its value becomes  $\approx 1,8$  times higher with the raising of quenching temperature of intercritical interval. Herewith the mixed ferritic-martensitic structure is formed, which dispersion increases with the raising of heating temperature for hardening of the mentioned interval.

The results are recommended to use in the development of thermal hardening modes of low-carbon and low-alloy steels, as well as in the evaluating the parameters of their technological and functional characteristics.

**Keywords:** intercritical interval, hardening coefficient, shtrips X70 steel, the degree of hardening, evenly elongation.

## Вплив температури загартування з міжкритичного інтервалу на характер деформаційного зміцнення сталі X70

В. Г. Гаврилова<sup>1)</sup>, Н. Є. Мак-Мак<sup>2)</sup>, М. О. Григор'єва<sup>3)</sup>

<sup>1), 2), 3)</sup> ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500

У роботі на основі аналізу діаграм розтягання зразків сталі X70, попередньо нормалізованих і загартованих у воді з міжкритичного  $A_{c1}$ - $A_{c3}$ -інтервалу, розраховані ступінь зміцнення, рівномірне подовження та коефіцієнт зміцнення як відношення різниці меж міцності та плинності до відносного подовження розривних зразків на ділянці діаграми розтягання, що відповідає рівномірному подовженню.

Установлений характер зміни коефіцієнта деформаційного зміцнення  $\eta^*$ . Його величина зі збільшенням температури загартування з міжкритичного інтервалу підвищується в  $\approx 1,8$  раза. При цьому формується змішана структура ферито-мартенситного типу, дисперсність якої зростає зі збільшенням температури нагрівання під загартування із зазначеного інтервалу.

Одержані результати рекомендується використовувати під час розроблення режимів термозміцнення маловуглецевих, низьколегованих сталей, а також при оцінюванні показників їх технологічних та службових характеристик.

**Ключові слова:** міжкритичний інтервал, коефіцієнт зміцнення, штрипсова сталь X70, ступінь зміцнення, рівномірне подовження.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хайстеркамп Ф. Ниобийсодержащие низколегированные стали / Ф. Хайстеркамп, К. Хулка, Ю. И. Матросов и др. – М.: Интернет инжиниринг, 1999. – 96 с.
2. Швейкин В. П. Микроструктура и фазовый состав низкоуглеродистых сталей после нагрева в межкритический интервал температур / В. П. Швейкин, В. А. Хогинов, В. М. Фарбер // Изв. Вузов, Черн. Мет. – 2008. – № 6. – С. 39–43.
3. Малинов Л. С. Влияние термообработки с нагревом в межкритический интервал температур на свойства сталей 60С2А и 60С2ХФА / Л. С. Малинов, И. Е. Мальшева, Д. В. Малинова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – №1. – С. 55–58.
4. Haitao Jiang. Influence of isothermal bainitis processing on the mechanical properties and microstructure characterization of TRIP-steel / Haitao Jiang, Hubin Wu, Di Tang, Qiang Lui // J. Univ. Sci. and Technol. Beijing. – 2008. – №5. – P. 574–579.
5. Урцев В. Н. Влияние деформации в двухфазной области на кинетику аустенит-феррит превращения в стали 08Г2С / В. Н. Урцев, В. Д. Дегтярев, В. В. Мухин и др. // Сталь. – 2005. – № 5. – С. 75–84.
6. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов. / А. А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
7. Конева Н. А. Природа стадий пластической деформации / Н. А. Конева // Соровский образовательный журнал. – 1998. – № 10. – С. 99–105
8. Конева Н. А. Классификация, эволюция и самоорганизация дислокационных структур в металлах и сплавах / Н. А. Конева // Соровский образовательный журнал. – 1996. – № 6. – С. 99–107
9. Беликов С. В. Влияние температуры нагрева в межкритический интервал на формирование субзеренной структуры в предварительно закаленных низколегированных сталях [Электронный ресурс] / С. В. Беликов, К. И. Сергеева, М. С. Карабаналов, А. А. Попов и др. // Современные проблемы науки и образования (электронный журнал). – 2013. – № 2. – С. 34–40. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8873>

## REFERENCES

1. Haysterkamp F., Hulka K., Matrosov Y. I., Morozov Y. D. et al (1999). Niobiisoderjashie nizekolegirovannii stali [Niobium-containing low alloy steels]. M: Intermet inzhiniring [in Russian].
2. Shveikin V. P., Khotinov V. A., Farber V. M. (2008). Mikrostruktura i fazovii sostav nizkouglerodistykh stali posle nagreva v mezhkriticheskii interval temperatur [The microstructure and phase composition of low-carbon steel after heating in the intercritical temperature range]. Izv. Vuzov Chern. Met. – Proceedings of the universities of ferrous metallurgy, 6. – 39–43 [in Russian].
3. Malinov L. S., Malysheva I. E., Malinova D. V. (2012). Vliyanie termoobrabotki s nagrevom v mezhkriticheskii interval temperatur na svoistva stali 60S2A I 60S2HFA [Influence of heat treatment with heating in the intercritical temperature range on the properties of steels 60Si2 and 60Si2CrV]. Metalurgicheskaya I gornorudnaia promishlennost. – Metallurgical and Mining Industry, 1, 55–58 [in Russian].
4. Haitao Jiang. Influence of isothermal bainitis processing on the mechanical properties and microstructure characterization of TRIP-steel / Haitao Jiang, Hubin Wu, Di Tang, Qiang Lui // J. Univ. Sci. and Technol. Beijing. – 2008. – № 5. – P. 574–579.
5. Urtsev V.N., Degtyarev V.D., Mukhin V.V. (2005). Vliyanie deformatsii v dvukhfaznoi oblasti na kinetiku austenite-ferit prevrasheniya v stali 08G2S. [Influence of deformation in the two-phase region on the kinetics of the austenite-ferrite transformation in the steel 08Mn2Si]. Stal. – Steel, 5, 75–84 [in Russian].
6. Bogatov A.A. (2002) Mehanicheskie svoistva I modeli razrusheniya metallov [The mechanical properties and fracture of metals model]. – Yekaterinburg: SEI HPE Ural STU, 329.
7. Koneva N.A. (1998) Priroda stadia plasticheskoi deformatsii [Nature stages of plastic deformation] Sorovskiy obrazovatelnyy jurnal. – Soros Educational Journal, 10, 99–105[in Russian].
8. Koneva N.A. (1996) Klassifikatsiya, evolutsiya I samoorganizatsiya dislokatsionnykh struktur v metallakh I splavakh [Classification, evolution and self-organization of dislocation structures in metals and alloys] Sorovskiy obrazovatelnyy jurnal. – Soros Educational Journal, 6, 99–107[in Russian].
9. Belikov S.V., Sergeeva K.I., Karabanalov M.S., Popov A.A. and etc. // (2013). Vliyanie temperaturi nagreva v mezhkriticheskii interval na formirovaniye subzerennoi struktury v predvaritelno zakalennykh nizkolegirovannykh staliakh [Effect of heating temperature in the intercritical interval of the formation of sub grain structure in the pre-hardened low-alloy steels]. Sovremennyye problemy nauki I obrazovaniya. – Modern problems of science and education (electronic journal), 2, 34–40. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=8873>