

УДК 669.018.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-7-290-17-22

*М. В. Ефимов, Н. А. Кидалов, Н. И. Габельченко, Р. В. Салфетников***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
И УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ЛИТЫХ И КОВАНЫХ ЗАГОТОВОК СТАЛИ 20ГМЛ
НА ИЗМЕНЕНИЕ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: mitlp@vstu.ru

В работе приведены результаты исследований по влиянию режимов термической обработки на механические свойства заготовок из стали 20ГМЛ. Показаны результаты испытаний предела текучести, предела прочности и ударной вязкости при температуре минус 40 °С литых и кованых образцов, прошедших однократную и двойную нормализацию с варьированием температуры выдержки в пределах от 870 до 960 °С. Представлены результаты исследований микроструктур данных образцов. Установлено, что повторная нормализация повышает значения ударной вязкости литых и кованых образцов во всем диапазоне исследованных температур термообработки. Предложен коэффициент, показывающий чувствительность механических свойств образцов на изменение режима термической обработки и температуру выдержки. Установлено, что проведение двойной нормализации дает возможность снижения чувствительности литых образцов к изменению температуры термической обработки и приводит к получению более стабильных результатов по механическим свойствам.

Ключевые слова: сталь, термическая обработка, механические свойства, нормализация, чувствительность

*M. V. Efimov, N. A. Kidalov, N. I. Gabelchenko, R. V. Salfetnikov***DETERMINATION OF THE SENSITIVITY OF MECHANICAL PROPERTIES
AND IMPACT STRENGTH OF CAST AND FORGED STEEL BILLETS 20GML
TO CHANGE THE HEAT TREATMENT REGIME****Volgograd State Technical University**

The paper presents the results of research on the effect of heat treatment modes on the mechanical properties of 20GML steel blanks. The results of tests of yield strength, tensile strength and toughness at a temperature of minus 40 °C of cast and forged samples that have undergone single and double normalization with a temperature variation of exposure in the range from 870 to 960 °C. The results of studies of the microstructures of these samples are presented. It was found that repeated normalization increases the values of the impact strength of cast and forged samples over the entire range of the studied heat treatment temperatures. A coefficient is proposed showing the sensitivity of the mechanical properties of the samples to changes in the heat treatment regime and the holding temperature. It was found that double normalization makes it possible to reduce the sensitivity of cast samples to changes in the temperature of heat treatment and leads to more stable results in mechanical properties.

Keywords: steel, heat treatment, mechanical properties, normalization, sensitivity

Введение

Одной из актуальных задач нефтегазового машиностроения в современных условиях является подбор и назначение материала изделия, отвечающего одновременно требованиям безопасности, техническим и экономическим требованиям.

Учитывая условия работы нефтегазового оборудования, применяемые материалы должны обеспечивать надежность и работоспособность изделий при высоких давлениях, воздействии коррозионноактивных сред и внешних климатических факторов, выраженных в низких внешних температурах до минус 60 °С [1, 2].

Активно развивающаяся отрасль промышленности и экономики определяет потребности в большом объеме металла для производства нефтегазового оборудования. Таким образом, использование специальных высоколегированных и дорогостоящих марок сталей экономически не оправдано [3]. Наиболее перспективным направлением является разработка способов получения высоких механических и эксплуатационных свойств на недорогих, доступных и относительно простых в изготовлении марках сталей путем подбора состава легирующих элементов в рамках марочного соответствия и эффективного режима термической обработки.

Кроме того, важным фактором является корректный выбор вида заготовки для изготовления деталей и узлов оборудования, который в нефтегазовой отрасли зависит не только от общепринятых факторов в машиностроении, таких как назначение и форма изделия, технологичность изготовления, экономическая целесообразность, но и от критериев обеспечения безопасности на опасных производственных объектах. Нормативно-техническая документация в области нефтяного и газового машиностроения дает четкие указания по возможности применения того или иного вида заготовки при определенных условиях эксплуатации (температуре и давлении), назначении оборудования и характеристиках рабочей среды (токсичность, взрывоопасность, воспламеняемость и др.). Также при выполнении прочностных расчетов оборудования, работающего под давлением, вводится поправочный коэффициент η к допускаемым напряжениям в зависимости от вида заготовки и ее контроля [4].

Для изготовления деталей сложной формы, таких как корпуса и рабочие органы компрессоров и насосов, корпуса запорно-измерительной аппаратуры, фитинги сложной конфигурации в нефтегазовой отрасли используются следующие виды заготовок: отливки и поковки.

Отливки применяются для производства изделий сложной конфигурации и формы. Методами литья могут быть получены внутренние полости различной формы. Однако отливки в нефтегазовом машиностроении относятся к заготовкам, для которых применяется понижающий поправочный коэффициент по прочности, обусловленный возможными скрытыми дефектами в теле заготовки. Поковки используются для производства деталей менее сложной конфигурации, но более ответственного с точки зрения безопасности назначения [5].

Для корректного назначения вида заготовки и режима термической обработки с целью получения требуемых механических и эксплуатационных свойств детали необходима информация об их взаимном влиянии. Таким образом, целью работы являлось установление зависимости воздействия режима термической обработки на механические и эксплуатационные свойства низколегированных литых и кованных заготовок.

Методика исследования

В качестве предмета исследования использовались восемь отливок из стали 20ГМЛ раз-

мерами $H = 90 \pm 10$ мм; $D = 365 \pm 15$ мм одной плавки, выдержанных в жидкостекольной форме 24 часа. Теплоизоляция прибыльной части производилась дробленым коксом, фракция 10–25 мм, сразу же после заливки. Образцы для исследования вырезались ниже прибыльной части.

В соответствии с ГОСТ 54153-2010, ГОСТ 22536.1-88, ГОСТ 2236.2-87 на спектрометре ДФС-71 и анализаторе МЕТАВАК CS-30 был определен химический состав металла отливок.

Каждая отливка была разделена на две равные части по осевой линии. Одна половина каждой отливки отковывалась. Из оставшихся половин отливок и полученных поковок были подготовлены образцы для определения микроструктуры, механических свойств, включая ударную вязкость KCU при минус 40 °С.

Методикой исследования предусматривалось проведение термообработки попарно (один литой образец + один образец поковки) в одной садке. Восемь образцов (четыре литых и четыре кованных) термообрабатывались по режиму нормализации с варьированием температуры выдержки от 870 до 960 °С и восемь образцов (четыре литых и четыре кованных) термообрабатывались по режиму двойной нормализации с температурой выдержки первой нормализации 940–960 °С и варьированием температуры выдержки второй нормализации от 880 до 960 °С. После нормализации все образцы прошли отпуск при температуре 620–650 °С.

Диапазон исследуемых температур нормализации был выбран исходя из вычисленной температуры критической точки A_{c3} , равной 857 °С, исследуемой стали с конкретным химическим составом (см. табл. 1) с применением формулы Т. Кунитакэ и Т. Като для Cr–Si–Mo сталей с содержанием углерода до 0,45 %; марганца в пределах 0,7...1,2 %; кремния в пределах 0,6...3,1 %; хрома в пределах 0,8...2,9 %; молибдена в пределах 0,2...0,9 % [6].

Механические испытания и отбор образцов производились в соответствии с ГОСТ 1497-84, ГОСТ 9454-78 на испытательной машине UTS500 и копере маятниковом РКР-450.

Из всех образцов были приготовлены микрошлифы для проведения анализа микроструктуры. Испытания и отбор образцов производились в соответствии с ГОСТ 2999-75, ГОСТ 9013-59 и ГОСТ 10243-75, травление осуществлялось 4% азотной кислотой.

Результаты исследования

По результатам исследования микроструктур было выявлено, что структуры литых образцов, прошедших термообработку по режиму нормализации с варьированием температуры

выдержки от 870 до 940 °С имеют феррито-перлитную структуру (см. рис. 1, *а*). При повышении температуры нормализации свыше 940 °С формируется более равновесная феррито-перлитная структура (см. рис. 1, *б*).

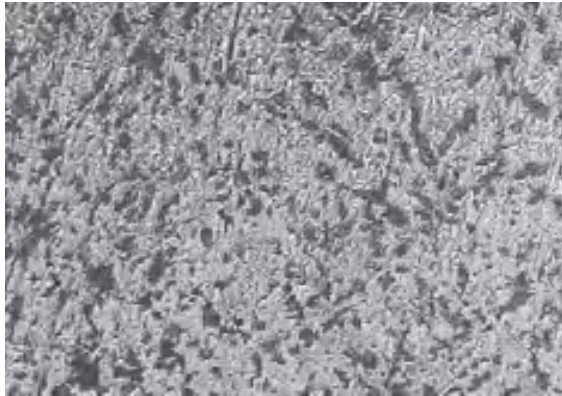
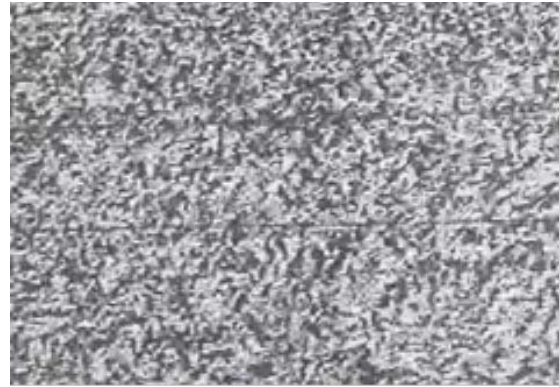
*а**б*

Рис. 1. Микроструктуры литых образцов ($\times 100$), прошедших термообработку с одним режимом нормализации:
а – температура выдержки 870–940 °С; *б* – температура выдержки 940–960 °С

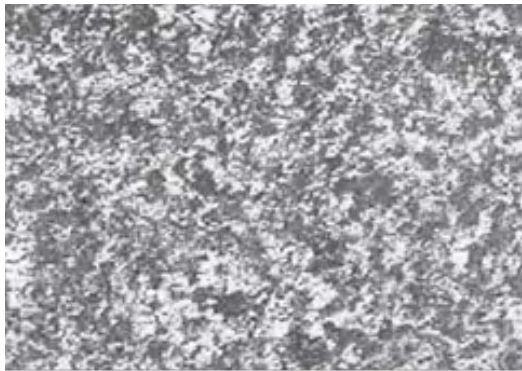


Рис. 2. Микроструктуры кованых образцов ($\times 100$), прошедших термообработку с одним режимом нормализации

Анализ микроструктур кованых образцов показал, что структуры всех образцов, прошедших термообработку по режиму нормализации с варьированием температуры выдержки от 870 до 960 °С, являются идентичными и имеют феррито-перлитную структуру (см. рис. 2).

Микроструктуры литых образцов, прошедших двойную нормализацию, представлены на рис. 3, микроструктуры кованых образцов – на рис. 4.

Микроструктуры всех образцов представлены ферритно-перлитной смесью. С ростом температуры повторной нормализации увеличивается размер зерна. У литых образцов баллы

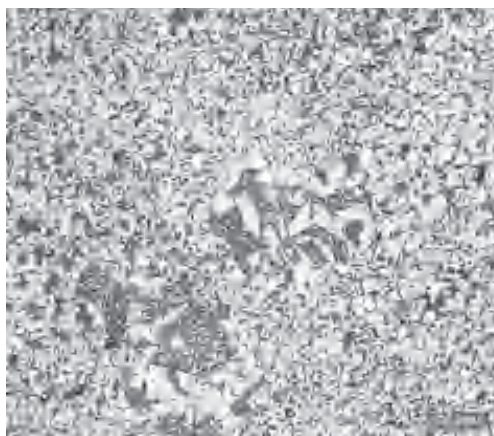
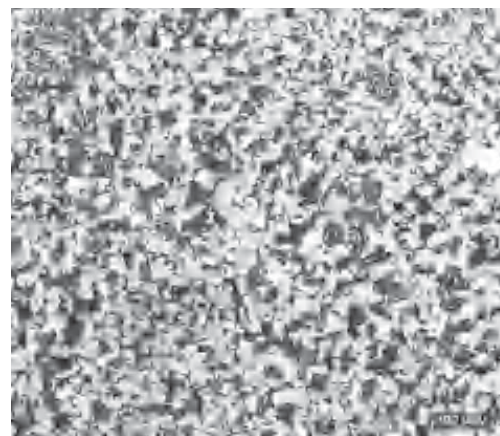
*а**б*

Рис. 3. Микроструктура литых образцов ($\times 100$), прошедших термообработку двойной нормализацией:
а – температура выдержки 870–890 °С; *б* – температура выдержки 920–940 °С

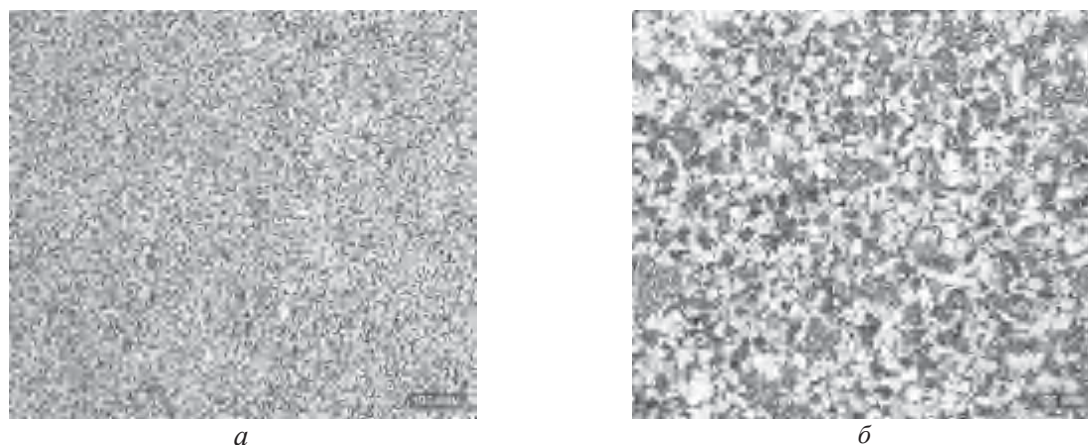


Рис. 4. Микроструктура кованных образцов ($\times 100$), прошедших термообработку двойной нормализацией: *а* – температура выдержки 870–890 °C; *б* – температура выдержки 920–940 °C

зерен при температуре повторной нормализации 870–890 °C – 9–10; при температуре повторной нормализации 920–940 °C – 8–9 (см. рис. 3); у кованных образцов при температуре повторной нормализации 870–890 °C – 10–11, при температуре повторной нормализации 920–940 °C – 8–9 (см. рис. 4).

При однократной нормализации исходной структурой является крупнозернистая литая структура с дендритными или внутрикристаллитными неоднородностями. При проведении же повторной нормализации исходной структурой является гомогенная однородная феррито-перлитная смесь. Чем тоньше исходная смесь, тем быстрее идет процесс аустенизации, так как

возникает больше зародышей аустенита и увеличивается скорость диффузии.

Механические свойства, ударная вязкость при температуре минус 40 °C литых образцов, полученных в данном исследовании, представлены в табл. 1. Столбец «Н+О» в данной таблице включает результаты испытаний образцов прошедших однократную нормализацию и отпуск; столбец «Н+Н+О» включает результаты испытаний образцов прошедших двойную нормализацию и отпуск. Столбец «%» показывает увеличение (со знаком «плюс») или уменьшение (со знаком «минус») соответствующих свойств при применении режима с двойной нормализацией.

Таблица 1

Механические свойства литых образцов

Диапазон температур, °C	Предел текучести, МПа			Предел прочности, МПа			Ударная вязкость КСЧ при минус 40°C, Дж/см ²		
	Н+О	Н+Н+О	%	Н+О	Н+Н+О	%	Н+О	Н+Н+О	%
870–890	358	358	0	539	441	–18,2	45	59	31,1
890–920	328	382	16,5	559	554	–1	15	111	640
920–940	534	392	–26,6	681	583	–14,4	20	102	410
950–970	568	397	–30,1	691	544	–21,3	9	52	478

Сравнительный анализ значений предела текучести, предела прочности и ударной вязкости при температуре минус 40 °C литых образцов, прошедших термообработку по режимам Н+О и Н+Н+О, показал, что проведение повторной нормализации значительно увеличивает значение ударной вязкости во всем диапазоне температур нормализации (в среднем в 2–2,5 раза).

Одновременно повторная нормализация снижает предел прочности и предел текучести в среднем на 12–17 %. При этом разброс значений предела текучести и прочности после повторной термообработки от температуры нормализации существенно уменьшается, что говорит о снижении чувствительности стали к температуре нормализации и повышении стабильности получаемых результатов.

Механические свойства, ударная вязкость при температуре минус 40 °С кованных образцов, полученных в данном исследовании, пред-

ставлены в табл. 2. Обозначения столбцов в табл. 2 приняты аналогичными обозначениям в табл. 1.

Таблица 2

Механические свойства кованных образцов

Диапазон температур, °С	Предел текучести, МПа			Предел прочности, МПа			Ударная вязкость КСЧ при минус 40 °С, Дж/см ²		
	Н+О	Н+Н+О	%	Н+О	Н+Н+О	%	Н+О	Н+Н+О	%
870–890	402	402	0	588	539	–8,3	125	135	8
890–920	387	426	10,1	583	588	1	125	154	23,2
920–940	363	456	25,6	564	627	11,2	95	140	47,4
950–970	397	461	16,1	588	637	8,3	53	127	140

Проведение повторной нормализации увеличивает значение ударной вязкости кованных образцов во всем диапазоне температур нормализации (в среднем на 40–70 %) и увеличивает предел прочности и предел текучести (в среднем на 10–15 %).

Для анализа чувствительности механических свойств и ударной вязкости литых и кованных образцов стали на изменение температуры нормализации и режима термической обработки в работе использовался коэффициент, отра-

жающий отклонение максимального или минимального показателя прочностных или пластических свойств от среднего значения, для всего исследованного диапазона температур:

$$K = \max \left\{ \frac{A_{\max} - A_{\text{ср}}}{A_{\text{ср}}}; \frac{A_{\text{ср}} - A_{\min}}{A_{\text{ср}}} \right\},$$

где $A_{\max}$, $A_{\min}$ – максимальное и минимальное значение соответствующего показателя; $A_{\text{ср}}$ – усредненное значение показателя на всем диапазоне температур.

Полученные значения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Показатели чувствительности механических свойств и ударной вязкости образцов на изменение температуры нормализации

Вид образца	Показатель чувствительности по пределу текучести, МПа		Показатель чувствительности по пределу прочности, МПа		Показатель чувствительности по ударной вязкости КСЧ минус 40 °С, Дж/см ²	
	Н+О	Н+Н+О	Н+О	Н+Н+О	Н+О	Н+Н+О
Литой	0,27	0,06	0,13	0,17	1,02	0,37
Кованный	0,06	0,08	0,03	0,10	0,47	0,11

Как видно из табл. 3, литые образцы обладают значительно более высокой чувствительностью к изменению параметров термической обработки, что выражается в существенных изменениях механических и пластических свойств, по сравнению с коваными образцами при изменении температуры нагрева при нормализации. Также необходимо отметить, что проведение повторной нормализации снижает чувствительность литых образцов к изменению температуры термической обработки по показателям предела текучести и ударной вязкости, а также кованных образцов по показателям ударной вязкости и незначительно увеличивает чувствительность литых и кованных образцов по показателям предела прочности.

Таким образом, проведение повторной нормализации дает возможность получения более стабильных результатов при термической обработке.

Выводы

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Проведение повторной нормализации незначительно снижает предел текучести и предел прочности литых образцов на 14 % по сравнению с механическими свойствами образцов, прошедших однократную термообработку; при этом полученные результаты находятся в пределах требований НТД.

2. Повторная нормализация увеличивает предел текучести на 13 % и предел прочности

на 3 % кованых образцов по сравнению с механическими свойствами образцов, прошедших однократную термообработку.

3. Ударная вязкость при температуре минус 40 °С увеличивается на 264 % у литых образцов и на 40 % у кованых после проведения повторной нормализации по сравнению с ударной вязкостью образцов, прошедших однократную термообработку.

4. Проведение двойной нормализации дает возможность снижения чувствительности литых образцов к изменению температуры термической обработки и приводит к получению более стабильных результатов по механическим свойствам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лашинский, А. А.* Основы конструирования и расчета химической аппаратуры : Справочник / А. А. Лашин-

ский, А. Р. Толчинский. – 4-е изд., стер. – М. : Альянс, 2011. – 752 с.

2. *Тимонин, А. С.* Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : Справочник / А. С. Тимонин ; Моск. гос. ун-т инж. экологии. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 1. – 850 с.

3. Solid-State Hydrogen Storage: Materials and Chemistry / G. Walker ; Institute of Materials, Minerals and Mining. – Elsevier Science, 2008. – 600 p.

4. ГОСТ 34233.1. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования [Текст]. – Введ. 2018–08–01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 29 с.

5. *Пегашкин, В. Ф.* Методы получения заготовок деталей машин : учебное пособие / В. Ф. Пегашкин, Е. В. Пегашкина ; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2016. – 81 с.

6. *Кунитакэ, Т.* Влияние различных легирующих элементов на Si–Cr–Mo–V стали / Т. Кунитакэ, Т. Като // Тэцу то хаганэ. – 1964. – Т. 50. – No 4.