

УДК 621.774

В. Б. Дементьев, доктор технических наук, профессор, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск
Н. А. Спичкин, кандидат технических наук, доцент, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск
А. А. Сухих, Институт прикладной механики УрО РАН, Ижевск

О ВЛИЯНИИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ОПЫТНЫХ СХЕМ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ 38ХНЗМФА

Рассматривается влияние термодформационных режимов опытных технологических схем упрочняющей обработки, в том числе ВТМО на структуру и механические свойства стали 38ХНЗМФА. Показано, что увеличение степени укова с 2,0 до 6,6 полностью исключает дендритную структуру в образце, повышает предел текучести на 20 %, предел прочности на 11 %, а температура отпуска влияет на механические свойства неоднозначно в зависимости от вида нагрева – печного или индукционного.

Ключевые слова: термодформационные режимы, структура, механические свойства.

Для ряда тяжело нагруженных полых цилиндров необходима разработка новых технологических схем формообразующе-упрочняющей обработки, которые бы повышали их нагрузочную способность в сложных условиях эксплуатации. Этого можно достичь, совершенствуя режимы и маршрут имеющейся технологии или вводя новые операции комбинированного термопластического воздействия на заготовку [1–5].

В качестве материала исследований использовали сталь 38ХНЗМФА, исходные заготовки – кольцевые высверловки в виде штанг $\varnothing 67 \times 1500$, вырезанных из сердцевины слитков ЭШП. Штанги разрезали на заготовки $\varnothing 67 \times 75$ и $\varnothing 67 \times 150$, которые подвергали обработке по приведенным в табл. 1. опытным технологическим схемам.

Таблица 1. Опытные технологические схемы упрочнения стали 38ХНЗМФА

№ п/п	Технологическая схема и режимы	Условное обозначение
1	Состояние поставки: выплавка стали в мартеновских печах с разливкой металла на УНРС для получения электродов для ЭШП + ЭШП электродов в слитки К-460-27 + отжиг слитков при 6500 °С, 30–35 ч.	СП
2	СП + нагрев 1150 °С, 40 мин в печи, охл. на воздухе + отпуск 550 °С, 2 ч	1150
3.1–3.7	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковами 2,13; 2,68; 3,03; 3,85; 4,60; 5,00; 6,6, охл. на воздухе + отпуск 550 °С, 2 ч	У2; У2,7; У3; У3,9; У4,6; У5; У6,6
4	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,0 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 4,6, охл. на воздухе + отпуск 550 °С, 2 ч	У2/У4,6
5	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,0 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,3, охл. на воздухе + отпуск 550 °С, 2 ч	У2/У3,3
6.1–6.4	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,13 + охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 2 ч + закалка 840 °С (в печи) в масло + отпуск 550 °С, 2 ч	У2П; У3,9П; У5П; У6,6П;
7	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 4,6, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 2 ч + закалка 840 °С (в печи) в масло + отпуск 550 °С, 2 ч	У2/У4,6П
8	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 200 °С, 2 ч	T200
9	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 300 °С, 2 ч	T300
10	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 400 °С, 2 ч	T400
11	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 450 °С, 2 ч	T450
12	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 500 °С, 2 ч	T500

Окончание табл. 1

№ п/п	Технологическая схема и режимы	Условное обозначение
13	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 550 °С, 2 ч	T550
14	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 600 °С, 2 ч	T600
15	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 200 °С, 2 ч	B200
16	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 300 °С, 2 ч	B300
17	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 400 °С, 2 ч	B400
18	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 450 °С, 2 ч	B450
19	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 500 °С, 2 ч	B500
20	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 550 °С, 2 ч	B550
21	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + ВТМО ($T_n = 970$ °С, $\varepsilon = 20$ %, охл. водой) + отпуск 600 °С, 2 ч	B600
22	СП + нагрев 1150 °С, 1–2 ч + свободная ковка с уковом 2,00 + нагрев 1150 °С, 1 ч + свободная ковка с уковом 3,30, охл. на воздухе + отпуск 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отпуск 400 °С, 7 мин	T400-7

Примечание. Температурные режимы свободнойковки:
 – температура началаковки 1150–1100 °С;
 – температура концаковки 950–850 °С

Для оценки качества упрочнения проводили механические испытания на растяжение (образцы тип 2, № 5, ГОСТ 1497–84), ударную вязкость (образцы по ГОСТ 9454–78 и ГОСТ В 5192–78) по стандартным методикам. Вязкость разрушения определяли в соответствии с РТМ 3–1419–80.

Для определения величины действительного аустенитного зерна использовали травление в растворе пикриновой кислоты, для выявления дендритной структуры – травление в царской водке ($\text{HNO}_3 + \text{HCl}$).

Электронно-микроскопические исследования проводили на фольгах, вырезанных из обломков образцов на ударный изгиб на электронном микроскопе ЭММА-3 при ускоряющем напряжении 100 кВ, строение изломов изучали с помощью сканирующего микроскопа РЭМ-200, рентгеноструктурные исследования осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 в излучении от Со-анода.

Проведенные обработка по опытным технологическим схемам и последующие исследования позволили установить, что степень укова, закалка послековки с различными степенями укова и температура отпуска оказывают следующее влияние на структуру и свойства стали 38ХНЗМФА.

Увеличение степени укова с 2,0 до 6,6 приводит к увеличению предела текучести с 1190 МПа до

1420 МПа, предела прочности – с 1370 МПа до 1530 МПа при сохранении ударной вязкости на уровне 0,6 МДж/м². Ковка с промежуточным отжигом (У2/У4,6) приводит к повышению вязкости до 0,74 МДж/м². В изломах наблюдаются участки трансформитного скола, протяженность участков сколов уменьшается с увеличением степени укова. С увеличением степени укова дендритная структура трансформируется в полосчатую (рис. 1), ликвидационные зоны растягиваются в полосы (рис. 2), что сопровождается увеличением анизотропии свойств. Так, после обработки У2 отношение вязкости продольных образцов к вязкости поперечных составляет 1,2, а после обработки У6,6 эта величина возрастает до 1,6. Это известно и может быть устранено отжигом послековки. В результатековки происходит измельчение аустенитного зерна со 2-3-го до 7-8-го балла.

Степень укова влияет также на форму и размеры частиц карбидной фазы. После малых величин укова карбиды крупные ($\approx 0,1$ мкм), имеют округлую форму. Микродифракционная картина соответствует типу карбида Me_3C . При малых уковах характер распределения карбидов соответствует верхнему бейниту, при больших – нижнему бейниту, после укова 6,6 карбиды различаются с трудом.

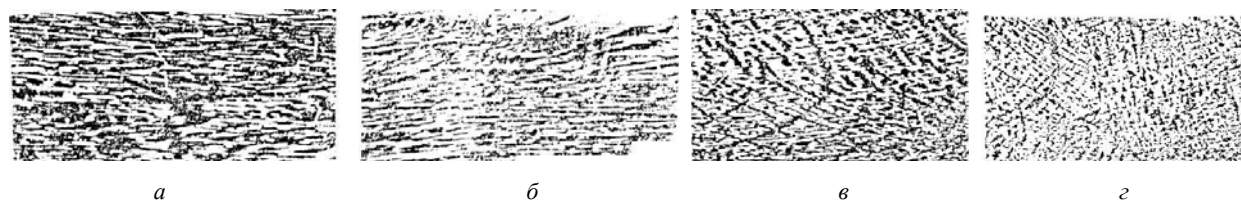


Рис. 1. Изменение дендритной структуры: а – без укова; б – уков 2; в – уков 5; з – уков 6,6

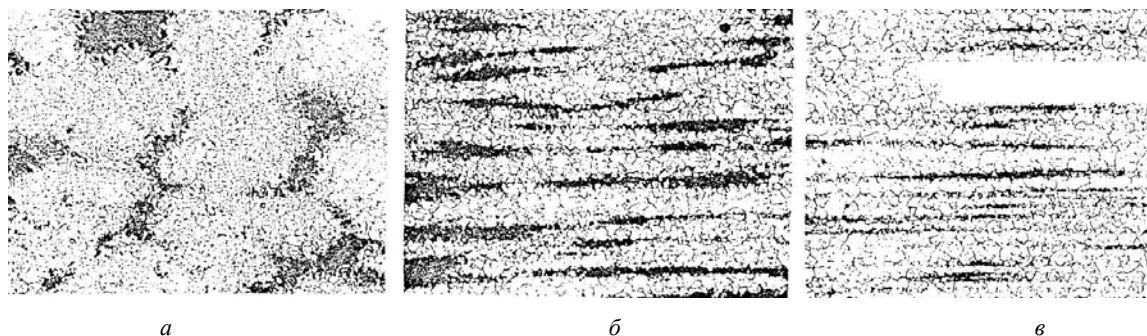


Рис. 2. Изменение формы ликвационных зон: а – уков 2; б – уков 4; в – уков 6,6

Влияет на структуру и свойства стали 38ХНЗМФА и последующая термообработка. Образцы послековки с различными степенями укова после охлаждения подвергались отпуску при температуре 670 °С и закалке с последующим отпуском при температуре 550 °С. Нагрев под закалку проводили: а) в печи до температуры 840 °С; б) токами высокой частоты в индукторе до температуры 970 °С. При этом часть заготовок после индукционного нагрева подвергалась пластической деформации винтовым обжатием со степенью деформации 20 %.

Установлено, что закалка с последующим отпуском приводит к некоторому снижению прочности и заметному увеличению вязкости (до 0,8 МДж/м² для образцов У6,6), а по отношению к образцам У2П на образцах У6,6П вязкость увеличилась на 15 %. Особенно заметно увеличилась вязкость на образцах, прошедших ковку с промежуточным отжигом (КСУ⁻⁵⁰ на уровне 0,9 МДж/м²). Нагрев ТВЧ с деформацией и без нее приводит к менее значительному увеличению вязкости. После закалки наблюдалось существенное изменение зерна. Так, после за-

калки с нагрева ТВЧ и пластической деформации винтовым обжатием (ВТМО) балл зерна может быть отнесен к 11-12-му. Измельчение зерна в этом случае свидетельствует о появлении новых рекристаллизованных зерен при температурах значительно ниже тех, которые необходимы для замены исходного зерна при обычной термообработке.

Влияние температуры отпуска на механические характеристики стали 38ХНЗМФА приведено в табл. 2. Из таблицы видно, что наиболее высокий комплекс свойств обеспечивается после отпуска при 200 °С. При более высоких температурах отпуска вплоть до 500 °С понижение прочности не сопровождается увеличением вязкости, что обусловлено развитием отпускной хрупкости. После отпуска при 200 °С излом имеет ямочное строение, свидетельствующее о микровязком характере разрушения. После отпуска при 300 °С и вплоть до 550 °С в изломе наблюдаются участки микросколов. Понижение температуры испытаний увеличивает долю хрупких участков, делает ямки более глубокими.

Таблица 2. Влияние температуры отпуска на свойства стали 38ХНЗМФА

Обработка	$t_{отп.}$ °С	$\sigma_{инь}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{вс}$ МПа	ψ , %	КСУ ^{-50*} МДж/м ²	КСУ ⁺²⁰ МДж/м ²	КСУ ⁻⁵⁰ МДж/м ²
Нагрев 1150 °С, 1–2 ч + горячая деформация свободной ковкой с уковом 2,0 + нагрев 1150 °С, 1 ч + горячая деформация свободной ковкой с уковом 4,6 охл. на воздухе + отп. 670 °С, 4 ч + закалка ТВЧ 970 °С в воду + отп., 2 ч	200	1400	1600	1960	47	0,82	0,51	0,42
	300	1340	1480	1670	55	0,59	–	–
	400	1290	1390	1470	53	0,54	–	–
	500	1160	1300	1370	54	0,72	–	–
	550	1150	1280	1350	58	0,74	0,62	0,42
	600	1030	1100	1160	63	1,34	–	–

КСУ^{-50*} – определено по ГОСТ 9454–78, КСУ – по ГОСТ В5192–78

Кроме того, с помощью электронагрева был проведен отпуск со скоростным нагревом образцов до температур 390 °С и 500 °С токами промышленной частоты (ТПЧ). Время выдержки составило 7 мин.

Предшествующая отпуску обработка заключалась в нагреве под закалку ТПЧ при 900 °С. Свойства, полученные после этого следующие:

– отпуск 390 °С:

$\sigma_{\text{пл}} = 1510$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1630$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = 1860$ МПа;
 $\psi = 40$ %; КСУ = 0,3 МДж/м²;

– отпуск 500 °С:

$\sigma_{\text{пл}} = 1269$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1360$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = 1540$ МПа;
 $\psi = 43$ %; КСУ = 0,32 МДж/м².

Одной из возможных причин, объясняющих различия в свойствах образцов, отпущенных при печном нагреве и нагреве ТПЧ, является различие во времени выдержки при температуре отпуска. Поэтому для сравнения проводили печной отпуск при такой же выдержке, что и при отпуске с нагревом ТПЧ (7 мин). Свойства стали при этом оказались следующие:

$\sigma_{\text{пл}} = 1320$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1460$ МПа; $\sigma_{\text{в}} = 1620$ МПа;
 $\psi = 55$ %; КСУ = 0,32 МДж/м².

Они отличаются от свойств после отпуска с нагревом ТПЧ, поэтому только сокращение времени выдержки – не единственная причина различия в свойствах, и, очевидно, нужно учитывать различную кинетику процессов, происходящих при отпуске в стали (распад мартенсита, перераспределение плотности дислокаций, образование и рост карбидов). Это, очевидно, может быть предметом дальнейших

исследований, а сопоставление полученных свойств показывает, что указанный отпуск ТПЧ близок по своим результатам к печному отпуску при температурах, близких к 200 °С.

Библиографические ссылки

1. Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. – М. : Металлургия, 1968.
2. Шаврин О. И. Технология и оборудование термомеханической обработки деталей машин. – М. : Машиностроение, 1983.
3. Дементьев В. Б., Спичкин Н. А. Перспективы применения совмещенных процессов термической и пластической обработки в производстве ствольных // Проблемы термодинамики и прочности : Сб. ст. – Ижевск : Изд-во ИПМ УрО РАН, 2005. – С. 270–279.
4. Дементьев В. Б., Спичкин Н. А., Сухих А. А. Создание изделий машиностроения с учетом новых технологических решений // Тр. XXIV Рос. школы «Наука и технологии». – Т. 1. – Москва, 2004. – С. 352–358.
5. Dementyev V., Spichkin N. About a new approach to the structure of the technological process of the manufacture of the machine components with thermomechanical strengthening / The 10-th China-Russian Symposium on Advanced Materials and Technologies. Rare Metals. – Vol. 28. – P. 757–760.

V. B. Dementyev, Doctor of Technical Sciences, Institute of Applied Mechanics, UB of RAS, Izhevsk

N. A. Spichkin, Candidate of Technical Sciences, Institute of Applied Mechanics, UB of RAS, Izhevsk

A. A. Sukhikh, Institute of Applied Mechanics, UB of RAS, Izhevsk

On Influence of Thermodeformation Modes of Prototype Schemes of Strengthening Processing on Structure and Properties of Steel 38ХНЗМФА

The influence of thermodeformation modes of prototype technological schemes of strengthening processing, including high-temperature thermomechanical processing, on structure and mechanical properties of steel 38ХНЗМФА is considered. It is shown that the setting ratio increase from 2,0 to 6,6 completely excludes dendritic structure formation in the sample, raises yield stress by 20 per cent and strength limit by 11 per cent. The tempering temperature influence on mechanical properties depends upon a heating method – furnace or induction.

Key words: thermodeformation modes, structure, mechanical properties.

УДК 621.9.02.04/622.24

Ю. А. Коротаев, доктор технических наук, ООО «ВНИИБТ «Буровой инструмент», Пермь

В. А. Иванов, доктор технических наук, профессор, Пермский государственный технический университет

В. А. Шулепов, ООО «Квадро», Пермь

ПОЛИРОВАНИЕ РОТОРОВ МНОГОЗАХОДНЫХ ВИНТОВЫХ ЗАБОЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И НАСОСОВ АБРАЗИВНЫМИ КРУГАМИ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ

Описано назначение чистовой зубообработки роторов винтовых забойных двигателей. Показаны преимущества и недостатки полирования роторов червячными и дисковыми абразивными кругами на вулканитовой связке. Описаны устройства для работы данными кругами и способы профилирования абразивных кругов, установлены рациональные режимы полирования.

Ключевые слова: винтовой забойный двигатель, ротор, полирование, абразивный круг, шероховатость поверхности.

Многозаходные винтовые забойные двигатели используются для бурения нефтяных и газовых скважин, а насосы – для перекачивания нефти, растворов и сыпучих материалов.

Основной частью двигателя и насоса является винтовая пара внутреннего зацепления, состоящая из ротора и охватывающего его статора с числом зубьев (заходов), отличающимися на единицу. Такие пары