

УДК 621.98.044.7

**А. М. Милюкова, А. В. Алифанов, А. И. Михлюк, А. И. Горчанин, А. Н. Матяс**  
Государственное научное учреждение «Физико-технический институт  
Национальной академии наук Беларуси», ул. Купревича, 10, 220141 Минск, Республика Беларусь,  
+375 (017) 267 60 10, annart@mail.ru,

## УЛУЧШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБ ПУТЕМ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

Проведены исследования микроструктур и прочностных свойств (ударная вязкость, предел текучести, твердость) после магнитно-импульсной обработки при различных режимах. Показано, что магнитно-импульсное воздействие при определенных оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемых марок для изготовления насосно-компрессорных труб.

**Ключевые слова:** насосно-компрессорные трубы; сталь; магнитно-импульсная обработка; энергия; импульс; упрочнение; физико-механические свойства; микроструктура.

Рис. 8. Табл. 9. Библиогр.: 6 назв.

**A. M. Milyukova, A. V. Alifanov, A. I. Mikhlyuk, A. I. Gorchanin, A. N. Matyas**  
State Scientific Institution “The Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus”,  
10 Kuprevich St., 220141 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (017) 267 60 10, annart@mail.ru,

## THE IMPROVEMENT OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF STEELS FOR MANUFACTURING PIPES BY MAGNETIC-PULSE TREATMENT

Microstructures and strength properties (impact strength, yield strength, hardness) after magnetic-pulse treatment under various conditions were studied. It is shown that the magnetic-pulse effect under certain optimal conditions can improve the physical and mechanical properties of the studied grades for the manufacture of tubing.

**Keywords:** tubing; steel; magnetic pulse treatment; energy; impulse; hardening; physical and mechanical properties; microstructure.

Fig. 8. Table 9. Ref.: 6 titles.

**Введение.** Целью работы является исследование влияния магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) на физические и механические свойства различных марок сталей, изготовленных ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга “БМК”» для насосно-компрессорных труб. Физико-механические свойства под влиянием МИО определяются твердостью, микротвердостью, структурными и фазовыми превращениями, величиной, знаком и глубиной остаточных напряжений, деформацией кристаллической решетки.

На протяжении последних лет учеными и специалистами государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси» (ФТИ, Минск) и учреждения образования «Барановичский государственный университет» (БарГУ, Барановичи) успешно развивается новое для Республики Беларусь научное направление — магнитно-импульсная упрочняющая обработка поверхностей металлических изделий. При воздействии МИО на сплавы устраняются дефекты в их кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла в поверхностном слое, что снижает трещинообразование, стабилизирует структуру, обеспечивает повышение прочности изделий и, соответственно, увеличивает их срок эксплуатации [1].



**Рисунок 1. — Насосно-компрессорные трубы**

нию структуры вблизи поверхности, относятся также фазовые превращения «аустенит—мартенсит», миграции примесей вблизи границ зерен, возникновение мелкодисперсной структуры на поверхности заготовки, связанное с образованием новых границ между зернами и дроблением пластинок цементита [3—5]. Осуществление этих процессов непосредственно связано с неоднородностью материала стали, локальным выделением теплоты вблизи границ зерен при протекании индукционных токов и магнитострикционными эффектами (в случае изделий, выполненных из магнитных сталей) [3].

В нефтегазодобывающей промышленности по всему миру в большом количестве применяются стальные насосно-компрессорные трубы (далее — НКТ) с резьбой (рисунок 1). Резьба НКТ нуждается в повышенных эксплуатационных характеристиках, поскольку многократная сборка и разборка частей трубы для обеспечения необходимой длины приводит к достаточно быстрому износу резьбовых соединений. Для упрочнения резьбы применяют различные методы и конструкторские решения (нанесение износостойких покрытий, специальные замки и др.).

В ФТИ были проведены научно-исследовательские работы для российского предприятия по упрочнению резьбы НКТ, которые показали, что под воздействием МИО при определенной энергии воздействия в резьбе образуется упрочненный слой глубиной до 100 мкм с повышенной микротвердостью, что подтверждает целесообразность применения для этой цели МИО [6].

**Оборудование и методика.** Для исследований возможности повышения износостойкости НКТ методом МИО открытое акционерное общество «Белорусский металлургический завод» предоставило сегменты труб из различных марок стали по международным стандартам. Приведем перечень исследуемых образцов (таблица 1) и химического состава марок сталей (таблица 2), применяемых для получения НКТ. Все они являются нелегированными конструкционными сталями, которые используются для изготовления горячекатаного полового профильного сварного проката.

**Т а б л и ц а 1. — Перечень образцов труб из марок сталей, применяемых для изготовления НКТ**

Номер образца	Плавка	Партия	Марка стали	Диаметр трубы (мм)	Толщина стенки (мм)
1	274967	175545	B/C/X42	88,9	7,62
2	369594	175636	S355J2H (1.0576)	70,0	12,50
3	368809	175285	32Г2А	88,9	13,00
4	273677	174136	Grade GT U110 mod 2	139,7	10,54
5	369238	175405	S355J0H (1.0547)	146,0	9,00
6	274456	175567	Grade GT U110 mod 1	139,7	9,17 (9,4)

Т а б л и ц а 2. — Химический состав исследуемых марок сталей, %

Марка стали	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
V/C/X42	≤ 0,28	< 1,65	< 0,03	< 0,03	0	—	—
S355J2H /1.0576/ (EN 10219-1)	≤ 0,22	< 1,6	< 0,03	< 0,03	< 0,55	—	—
32Г2А (ОСТ 14-21-77)	≤ 0,3	1,2...1,45	< 0,02	< 0,02	0,2...0,35	< 0,3	< 0,3
Grade GT U110 mod2 (C110 U)	1...1,1	0,1...0,35	< 0,03	< 0,03	< 0,1-0,3	—	—
S355J0H /1.0547/ (EN 10219-1)	≤ 0,22	< 1,6	< 0,03	< 0,03	< 0,55	—	—
Grade GT U110 mod1	1...1,1	0,1...0,35	< 0,03	< 0,03	< 0,1...0,3	—	—

Для МИО образцов сталей использовались магнитно-импульсные установки (МИУ), оснащенные цилиндрическими индукторами, изготовленные в лаборатории объемных гетерогенных систем ФТИ (рисунок 2).

Для определения оптимального режима упрочнения резьбы проведена металлография микроструктуры шлифов всех сегментов труб, выполнены измерения твердости и микротвердости поверхности, температуры нагрева образцов после первого, второго, третьего импульсов воздействия, суммарного макронапряжения до и после МИО при различных технологических режимах (энергии воздействия 6, 8, 10 кДж по 2...4 импульса) на магнитно-импульсных установках МИУ-2, МИУ-3. Использовался цилиндрический индуктор диаметром 23 мм индуктивностью 20 мГн, который на МИУ-3 работает с частотой 6 кГц, а на МИУ-2 — с частотой 18 кГц.

Из сегментов труб приготовили шлифы на пробоприготовительном комплексе с применением шлифовально-полировального станка DIGIPREP 251. Микроструктуру шлифов до и после МИО исследовали на световом микроскопе MCF-3 фирмы Reichert (Австрия).

Определение твердости образцов проводили по методу Роквелла (ГОСТ 9013) на стационарном полуавтоматическом приборе ТК-2М с механическим и электрическим приводом с погрешностью измерения ±3 %. Температуру образцов до и после каждой МИО измеряли с помощью мультиметра ALEX 9808+ с термопарой ТХА (ГОСТ 1790) с погрешностью измерения ±1 % при температуре от -20...+400 °С и с погрешностью измерения ±1,5 % при температуре от 400 до 1 000 °С.



**Рисунок 2. — Магнитно-импульсные установки с различными техническими характеристиками для обеспечения упрочняющего воздействия на стальные изделия**

Измерение температуры носит скорее качественный сравнительный характер, а не количественный, так как под воздействием МИО высокая температура (700...1 000 °С) возникает в локальных очагах с большей или меньшей концентрацией различных дефектов. В результате этого и происходят структурно-фазовые преобразования. Но высокая температура мгновенно рассеивается по всему объему образца, и на поверхности измеряемая температура достигает 20...100 °С. Однако в различных сталях и при различных режимах МИО температура заметно меняется, что говорит о большем или меньшем проникновении в образец тепловой энергии.

Из сегментов труб изготовили стандартные образцы для испытаний на ударный изгиб (10 × 10 × 50 мм) из марок стали № 2, 3, 4; образцы для испытаний на растяжение (по ГОСТ 1497, тип III) из марок стали № 1, 5, 6.

Испытания на ударный изгиб проводили по ГОСТ 9454 на маятниковом копре PSWO 30 при следующих условиях: максимальная энергия удара при испытаниях — 300 Дж (15 кгс · м), скорость маятника в момент удара — 5,6 м / с, температура воздуха составляла 20 °С, при охлаждении образцов опускалась до –25 °С (охлаждение проводили в жидком азоте в связи с тем, что трубы могут использоваться в северных широтах).

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497 на разрывной машине с использованием штангенциркуля в соответствии с требованиями ГОСТ 166, микрометра в соответствии с требованиями ГОСТ 6507, тензометров в соответствии с требованиями ГОСТ 18957.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Образцы, изготовленные из исследуемых марок стали, подвергли МИО на МИУ (высокочастотной МИУ-2 и низкочастотной МИУ-3) при различных технологических режимах: энергии воздействия 6, 8, и 10 кДж по 2...4 импульса.

В таблице 3 представлены результаты измерений твердости *HRB*, микротвердости *HV* поверхности образцов стали, температуры нагрева поверхности образцов после первого, второго, третьего импульсов МИО, среднесуммарное макронапряжение до и после обработки. Следует отметить, что контрольные образцы являются эталонами, у которых зарубежными изготовителями зафиксированы основные свойства.

Анализ результатов исследований (см. таблицу 3) показывает, что у образцов из различных марок сталей даже при одинаковых режимах МИО изменение микротвердости и среднесуммарное макронапряжение (учитывающее результаты обработки всех образцов из данной стали) отличаются в некоторых случаях довольно значительно. Наиболее существенные изменения микротвердости (столбец 7 в таблице 3) выделены жирным шрифтом.

Интересные результаты получили при МИО образцов из стали X42: у образца 1.3, обработанного на установке МИУ-2 двумя импульсами по 6 кДж, микротвердость увеличилась на 13,1 %; у образца 1.2, обработанного на установке МИУ-3 тремя импульсами по 8 кДж, микротвердость уменьшилась на 4,8 %. Видно, что у образца 1.2 исходная микротвердость до МИО намного выше (170,8 *HV*), чем у образца 1.3 (142,9 *HV*). Видимо, в результате воздействия на образец 1.2 трехкратного импульса большей энергии (8 кДж), чем при воздействии на образец двух импульсов по 6 кДж, произошло эффективное устранение или исправление различных дефектов в поверхностном слое (искажение кристаллической решетки, внедрение атомов, внутренние напряжения и др.), что привело к некоторому снижению микротвердости.

Увеличение микротвердости на 13,1 % при воздействии МИО на образец 1.3 связано, по-видимому, с образованием мелкозернистой структуры и, соответственно, с появлением большого количества межзеренных границ.

Т а б л и ц а 3. — Свойства образцов исследуемых марок стали до и после МИО при различных технологических режимах

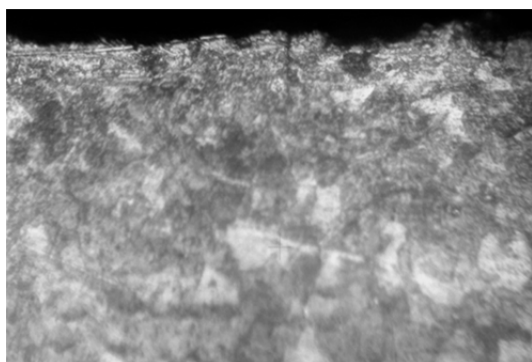
Материал и маркировка образца	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Твердость, HRB	Микротвердость средняя, HV, кг / мм <sup>2</sup>			Среднесуммарное макронапряжение, МПа
				до МИО	после МИО	% изменения	
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1. X42</b>							
1.1	Контрольный	20*	75	158,7	—	0	Эталон
1.2	8 × 3, МИУ-3	27/33/36	75	170,8	162,6	-4,8	—
1.3	<b>6 × 2, МИУ-2</b>	43/70/80	75	142,9	161,6	<b>13,1</b>	—
<b>2. S355J2H</b>							
2.1	Контрольный			167,6	—	0	—
2.2	<b>8 × 3, МИУ-3</b>			167,6	200,7	<b>19,7</b>	—
							До МИО — 959, после МИО — 584
<b>3. 32Г2А</b>							
3.1	Контрольный	20*	92	229,1	—	0	Эталон
3.2	6 × 3, <b>МИУ-3</b>	25/30/34	93	219,5	259,9	18,4	—
3.3	7 × 3, <b>МИУ-3</b>	28/34/48	93	198,0	214,9	8,5	—
3.4	<b>8 × 3, МИУ-3</b>	27/33/36	93	219,5	268,0	<b>22,0</b>	—
							До МИО — 1 398, после МИО — -1021
<b>4. Grade GT U110 mod 2</b>							
4.1	Контрольный	20*	103	222,6	—	0	Эталон
4.2	6 × 3, МИУ-3	24/29/32	101	222,6	227,4	2,2	—
4.3	7 × 3, МИУ-3	27/40/41	101	246,5	252,1	2,3	—
4.4	8 × 3, МИУ-3	27/31/34	101	221,1	224,2	1,4	—
4.5	8 × 3, МИУ-2	43/70/86	101	213,4	213,4	0	—
4.6	10 × 3, МИУ-2	48/77/95	101	222,6	256,0	15,0	—
4.7	<b>12 × 3, МИУ-2</b>	52/85/100	101	222,6	259,9	<b>17,0</b>	—
							До МИО — -359, после МИО — -293
<b>5. S355J0H</b>							
5.1	Контрольный	20*		222,6	—	0	Эталон
5.2	8 × 3, МИУ-3	34/38/42		222,6	200,7	-6,6	—
5.3	6 × 3, МИУ-2			196,7	222,6		—
							До МИО — -358, после МИО — 732
<b>6. Сталь Grade GT U110 mod 1</b>							
6.1	Контрольный	20*	100	259,9	—	0	—
6.2	<b>12 × 3, МИУ-2</b>	52/85/100	101	256,0	263,9	1,6	—
							До МИО — -358, после МИО — 146

При обработке образца 2.2 из стали S355J2H тремя импульсами по 8 кДж каждый на низкочастотной установке МИУ-3 микротвердость образца увеличилась на 19,7 %, что связано, видимо, как и в предыдущем случае, с образованием мелкодисперсной структуры и большого количества межзеренных границ, а это, в свою очередь, произошло под влиянием температуры первичной рекристаллизации, возникшей в результате МИО.

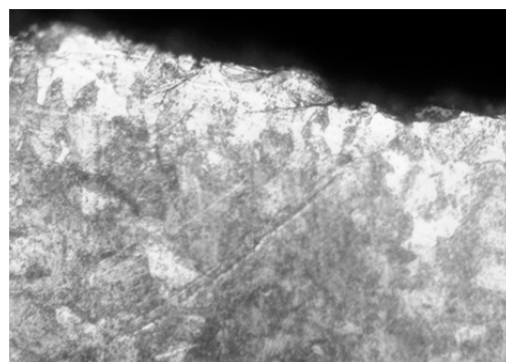
Таким же образом можно объяснить существенные повышения микротвердости при воздействии МИО на образцы 3.2, 3.3 и 3.4 (сталь 32Г2А), 4.6 и 4.7 (сталь Grade, mod 2), 5.3 (сталь S355J0H) и 6.2 (сталь Grade, mod 1).

Интересно, что изменения микронапряжений в различных сталях при различных режимах МИО носят неоднозначный характер, что требует проведения дополнительных исследований.

Были проведены металлографические исследования всех образцов стали до и после МИО, результаты которых представлены на рисунках 3—8. Структура исследуемых марок стали представляет собой мелкозернистый отпущенный мартенсит. Структура двух образцов (1.2 и 1.3) стали X42 показана на рисунках 3 и 4, где видно, что при МИО на поверхности образуется модифицированный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета, который не поддавался травлению, так как, видимо, имеет повышенную плотность с выделением карбидов.

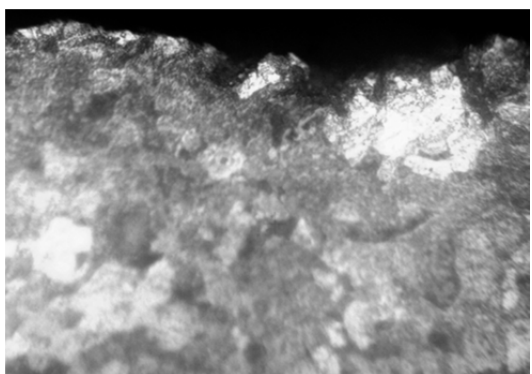


а)

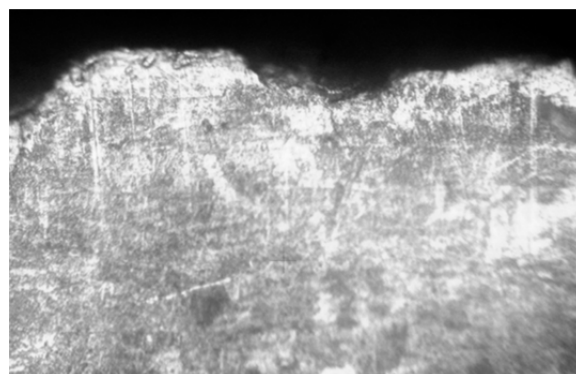


б)

Рисунок 3. — Микроструктура образца 1.2 стали X42 до МИО (а), после МИО (б). × 400



а)



б)

Рисунок 4. — Микроструктура образца 1.3 стали X42 до МИО (а), после МИО (б). × 400

Микроструктура образца стали S355J2H показана на рисунке 5, где видно, что после МИО (см. рисунок 5, б) поверхность покрыта крупными цементитными областями светлого цвета.

Микроструктура образца стали S355J0H, показанная на рисунке 6, имеет значительно более мелкое зерно, чем аналогичная по химическому составу сталь S355J2H; после МИО (см. рисунок 6, б) видно, что образуется модифицированный уплотненный слой глубиной 8...20 мкм светлого цвета.

Из рисунка 7, на котором показаны микроструктуры образца из стали 32Г2А до МИО (а) и после МИО (б), видно, что текстурированные уплотненные слои (см. рисунок 7, а) после МИО распадаются на многочисленные отдельные сегменты, довольно равномерно распределённые на поверхности, что должно благоприятно повлиять на прочность образца.

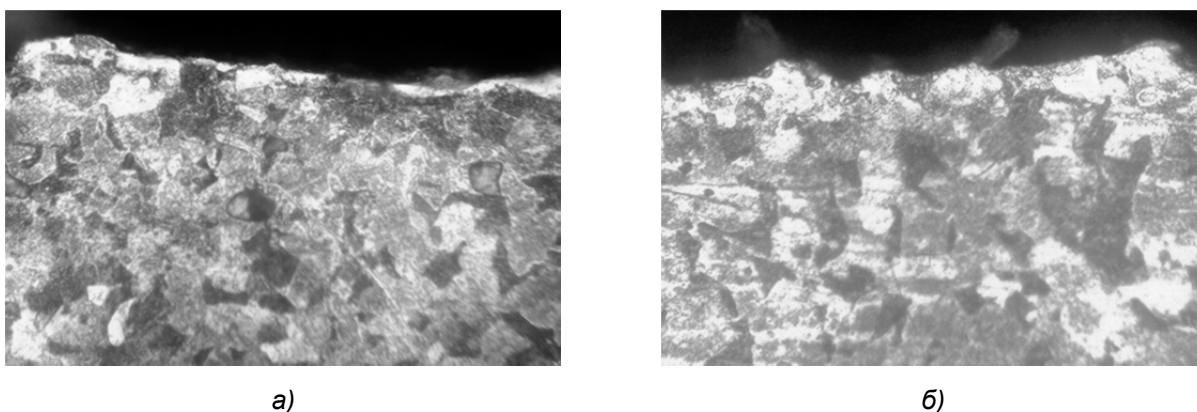


Рисунок 5. — Микроструктура образца 2.3 стали S355J2H до МИО (а), после МИО (б). × 400

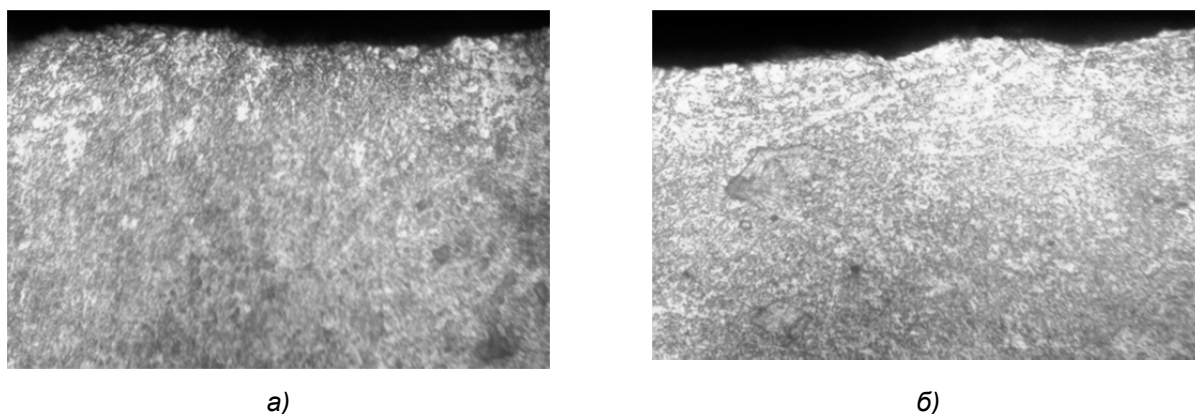


Рисунок 6. — Микроструктура образца 5.2 стали S355J0H до МИО (а), после МИО (б). × 400

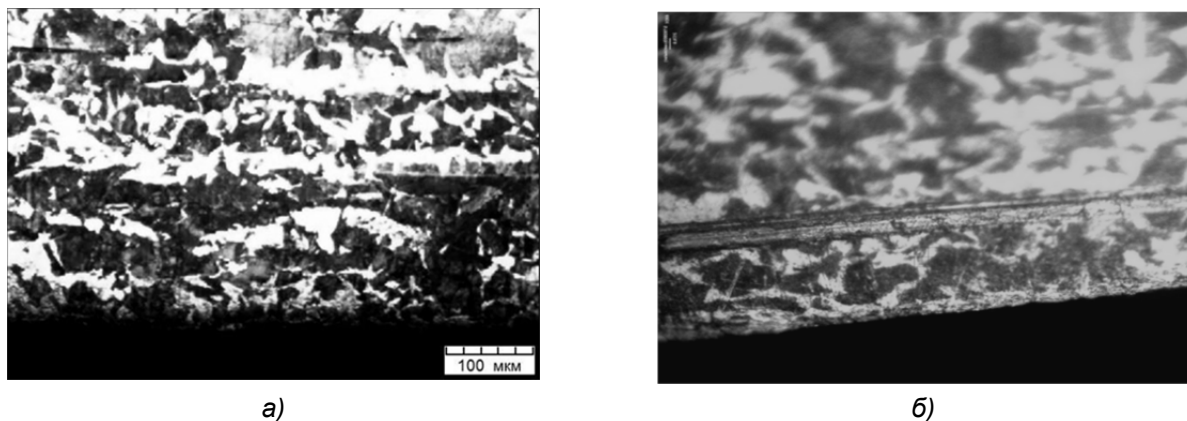


Рисунок 7. — Микроструктура образца 3.4 стали 32Г2А до МИО (а), после МИО (б). × 400

На рисунке 8 показаны микроструктуры образца 6.2 из стали Grade GT U110 mod 1 до МИО (а) и после МИО (б). Анализ микроструктуры показывает, что после МИО структура приобрела мелкозернистый, более однородный характер, благодаря чему должны улучшиться прочностные характеристики образца.

На основании анализа проведенных исследований были выбраны наиболее рациональные режимы МИО, при которых проявляется улучшение структуры образцов, повышение микротвердости поверхности, снижение суммарных остаточных макронапряжений, что позволит улучшить прочностные характеристики резьбы на трубах, изготовленных из исследованных марок стали.

По выбранным оптимальным режимам обработали образцы, изготовленные для проведения испытаний на растяжение и ударный изгиб, результаты которых представлены в таблицах 4—9.

Из таблицы 4 видно, что у образца из стали X42 после МИО несколько повысились пластические свойства, что, как правило, приводит к уменьшению хрупкости изделия, в данном случае резьбы насосно-компрессорной трубы.

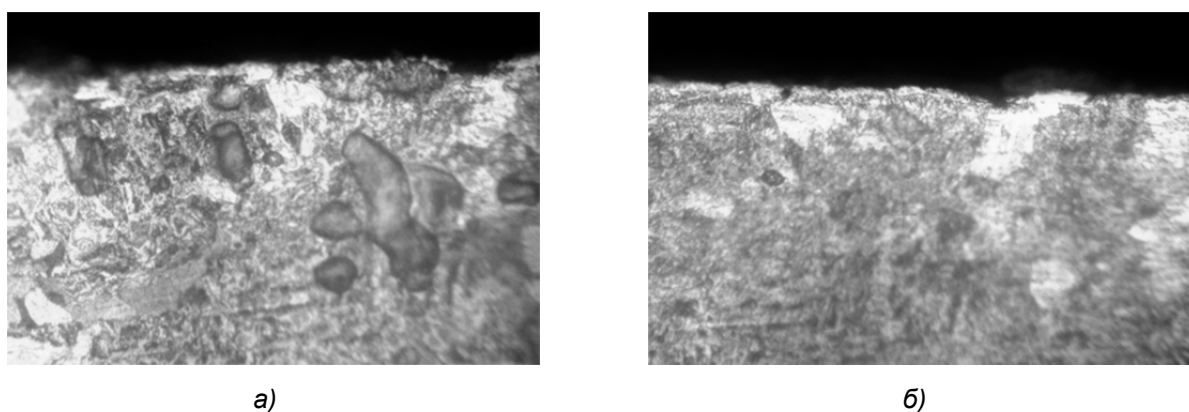


Рисунок 8. — Микроструктура образца 6.2 стали Grade GT U110 mod 1 до МИО (а), после МИО (б).  $\times 400$

Т а б л и ц а 4. — Результаты испытаний образцов стали X42 после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж $\times$ кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , Н / мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву $\sigma_{\text{в}}$ , Н / мм <sup>2</sup>	Относительное сопротивление разрыву $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
1.1	Контрольный	24*	125	550	28	52
1.3	6 $\times$ 2, МИУ-2	40/52	156	529	24	48

Т а б л и ц а 5. — Результаты испытаний образцов стали S355J2H после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж $\times$ кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, $^{\circ}\text{C}$	Вид испытаний и температура испытания T, $^{\circ}\text{C}$	Результаты испытаний		
				Площадь $S_0$ , см <sup>2</sup>	KU, кгс $\cdot$ м	KCU, Дж / см <sup>2</sup>
2.1	Контрольный шлиф	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	19,5	244,0
2.2	8 $\times$ 3, МИУ-3	43/45/49		0,8	18,0	225,0
2.3	8 $\times$ 3, МИУ-3	42/44/50		0,8	23,4	293,0
2.4	8 $\times$ 3, МИУ-3	43/46/54	Ударная вязкость, -25	0,8	17,1	209,5



Анализ проведенных исследований показал, что МИО образцов стали S355J2H при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов в 2...2,3 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных прочностных свойств (ударная вязкость  $KU$ ,  $KCU$ ) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 2.1 до МИО, повысились в одном образце из трех (см. таблицу 5, образец 2.3). Образец 2.4, который подвергался ударному изгибу при температуре  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , показал заметно меньшие величины  $KU$  и  $KCU$ , что объясняется повышением хрупкости сталей при низких температурах.

Из таблицы 6 видно, что МИО образцов стали 32Г2А на низкочастотной установке МИУ-3 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов почти в 2 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных свойств (ударная вязкость  $KU$ ,  $KCU$ ) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 3.1 до МИО, понизились на 50 % у образцов 3.2, 3.3 и 3.4. Образец 3.5 после МИО показал некоторое увеличение  $KU$  и  $KCU$ , что можно объяснить образованием благоприятной структуры.

Из таблицы 7 видно, что МИО образцов стали Grade GT U110 mod 2 на высокочастотной установке МИУ-2 при выбранных технологических режимах повысила температуру образцов почти в 2 раза после трех импульсов воздействия и в 4,4 раза — после шести импульсов.

Т а б л и ц а 6. — Результаты испытаний образцов стали 32Г2А после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Вид испытаний и температура испытания $T$ , °С	Результаты испытаний		
				Площадь $S_0$ , см <sup>2</sup>	$KU$ , кгс · м	$KCU$ , Дж / см <sup>2</sup>
3.1	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	6,5	81,0
3.2	8 × 3, МИУ-3	35/45/50		0,8	6,0	75,0
3.3	8 × 3, МИУ-3	38/48/52	Ударная вязкость, -25	0,8	4,1	50,2
3.4	8 × 3, МИУ-3	34/40/46		0,8	4,1	50,2
3.5	8 × 3, МИУ-3	32/41/45	Ударная вязкость, +20	0,8	6,8	83,3

Т а б л и ц а 7. — Результаты испытаний образцов стали Grade GT U110 mod 2 после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Вид и температура испытания $T$ , °С	Результаты испытаний		
				Площадь $S_0$ , см <sup>2</sup>	$KU$ , кгс · м	$KCU$ , Дж / см <sup>2</sup>
4.1	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	1,4	17,5
4.2	6 × 6, МИУ-2	24/29/32(1) 63/76/85		0,8	2,0	25,0
4.3	6 × 6, МИУ-2	27/40/41(1) 64/96/109		0,8	1,9	23,7
4.4	6 × 6, МИУ-2	27/31/34(1) 51/60/86		0,8	1,7	21,3
4.5	Контрольный	24*	Ударная вязкость, -25	0,8	1,2	14,7
4.6	6 × 6, МИУ-2	50/60/70		0,8	1,3	15,9
4.7	6 × 6, МИУ-2	52/80/105		0,8	1,6	19,6
4.8	12 × 3, МИУ-2	53/86/100		0,8	2,2	27,0

Величины исследованных свойств (ударная вязкость  $KU$ ,  $KCU$ ) при положительных и отрицательных температурах после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольных образцах 4.1 и 4.5 до МИО, повысились почти во всех образцах. Только в образцах 4.5. и 4.6 они понизились (исследования проводились при отрицательной температуре, которые снижают пластичность образца). Эти результаты показывают высокую эффективность выбранных режимов МИО для стали Grade GT U110 mod 2 (см. таблицу 7).

Из таблиц 8, 9 видно, что МИО образцов из стали S355J0H на установке МИУ-3 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов менее чем в 2 раза после трех импульсов воздействия. Величины исследованных прочностных свойств  $\sigma_b$ ,  $\psi$  после МИО образца 5.2 в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 5.1 до МИО, несколько повысились. Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  снизился в обоих образцах, относительное сопротивление разрыву  $\delta$  увеличилось на 4 %. Величины ударной вязкости  $KU$ ,  $KCU$  в сравнении с данными контрольного образца 5.4 повысились в образце 5.5, но понизились в образце 5.6.

Из таблицы 10 видно, что МИО образцов стали Grade GT U110 mod 1 на установке МИУ-2 при выбранном технологическом режиме повысила температуру образцов в 3 раза после шести импульсов воздействия. Величина  $\sigma_b$  после МИО в сравнении с данными, полученными на контрольном образце 6.1 до МИО, повысилась в образце 6.3 на 3,6 %; относительное сужение  $\psi$  в образце 6.2 увеличилось на 10 %. Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  повысился в обоих образцах, относительное сопротивление разрыву  $\delta$  снизилось в обоих образцах на 4...6 %.

Т а б л и ц а 8. — Результаты испытаний образцов стали S355J0H после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов МИО, °С	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , Н / мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , Н / мм <sup>2</sup>	Относительное сопротивление разрыву $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
5.1	Контрольный	24*	379	716	32	54,8
5.2	6 × 3, МИУ-3	34/38/42	328	727	36	45,6
5.3	6 × 3, МИУ-3	33/36/42	336	712	36	68,6

Т а б л и ц а 9. — Результаты испытаний образцов стали S355J0H после МИО на ударный изгиб

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура нагрева исходная* и после 1/2/3 импульсов, °С	Вид и температура испытания T, °С	Результаты испытаний		
				Площадь $S_0$ , см <sup>2</sup>	$KU$ , кгс · м	$KCU$ , Дж / см <sup>2</sup>
5.4	Контрольный	24*	Ударная вязкость, +20	0,8	19,6	245
5.5	6 × 3, МИУ-3	32/34/37		0,8	20,2	253
5.6	6 × 3, МИУ-3	31/33/38		0,8	18,5	231

Т а б л и ц а 10. — Результаты испытаний образцов стали Grade GT U110 mod 1 после МИО на растяжение

Маркировка образца стали	Режим обработки в цилиндрическом индукторе, кДж × кол-во импульсов	Температура МИО нагрева через каждые 2 имп., °С	Результаты испытаний			
			Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , Н / мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление разрыву $\sigma_b$ , Н / мм <sup>2</sup>	Относительное сопротивление разрыву $\delta$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %
6.1	Контрольный	24	467	774	20	30
6.2	6 × 6, МИУ-2	64/68/73	494	723	14	33
6.3	6 × 6, МИУ-2	62/70/72	514	802	16	27

В результате анализа проведенных исследований можно сделать вывод, что при МИО на установке МИУ-2 образцы исследованных марок трубной стали нагреваются с большей скоростью и на большую величину, чем на МИУ-3.

Температура нагрева оказывает существенное влияние на структурные превращения в поверхностном слое образцов. Сравнительные исследования физико-механических свойств до и после МИО показали, что прочностные свойства ( $KU$ ,  $KCU$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) повысились в большей мере (до 2 раз) при обработке на МИУ-2 при оптимальном режиме воздействия.

**Заключение.** Анализ результатов исследований микроструктур и прочностных свойств (ударная вязкость  $KU$ ,  $KCU$ , предел текучести  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) после МИО с различными режимами показали, что магнитно-импульсное воздействие при рекомендуемых оптимальных режимах позволяет улучшить физико-механические свойства исследуемых марок стали, изготовленных ОАО «БМЗ» по иностранным стандартам. При выполнении научных исследований определены параметры наиболее рациональных технологических режимов упрочняющей МИО шести марок стали для изготовления НКТ для нефтегазодобывающей промышленности.

#### Список цитируемых источников

1. Алифанов, А. В. Физика процесса магнитно-импульсного упрочнения стальных изделий, расчет индукторов и параметров процесса / А. В. Алифанов, Д. А. Ционенко, А. М. Милюкова // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Клубовича. — Витебск : ВГТУ, 2017. — Гл. 2. — С. 31—52.
2. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин / Б. В. Малыгин. — М. : Машиностроение, 1998. — 130 с.
3. Магнотриксционный механизм образования мелкодисперсной структуры в стальных изделиях при магнитно-импульсном воздействии / А. В. Алифанов [и др.] // Весн. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. — 2016. — № 4. — С. 31—36.
4. Modeling of non-stationary diffusion of alloying elements on exposure of steel samples to magnetic pulses / A. Alifanov [et.] // 15-th International Scientific Conference “TRANSFER 2014” Alexander Dubcek University of Trencin, 23—24.10.2014, Trencin, Slovakia. — P. 10—14.
5. Импульсные методы обработки материалов / АН БССР, Физ.-техн. ин-т. — Минск : Наука и техника, 1977. — 216 с.
6. Исследование влияния магнитно-импульсного воздействия на структуру полых стальных изделий с поверхностью сложного профиля / А. В. Алифанов [и др.] // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. науч. тр. : в 3 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2015. — Кн. 2 : Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / гл. ред. С. А. Астапчик. — С. 19—26.

Поступила в редакцию 05.05.2020