

УДК 004.94; 621.373

А. В. Алифанов¹, доктор технических наук, профессор,

В. В. Клубович², академик, доктор технических наук, профессор,

А. М. Милюкова³, кандидат технических наук, доцент,

В. В. Малеронок⁴, кандидат технических наук, **О. А. Толкачева**⁵, **Е. В. Хрущов**⁶

^{1,3,5} Государственное научное учреждение «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси», ул. Академика Купревича, 10, 220084 Минск, Республика Беларусь, +375 (17) 367 60 10

¹ Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

^{2,6} Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, 220013 Минск, Республика Беларусь

⁴ Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», ул. Уборевича, 77, 220096 Минск, Республика Беларусь

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ РЕССОРНО-ПРУЖИННОЙ СТАЛИ В ЦЕЛЯХ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ

Проведены исследования физико-механических свойств пружинных сталей до и после комбинированной термической, ультразвуковой и магнитно-импульсной обработок при различных режимах. Показано, что комбинированный метод обработки при определенных параметрах режимов позволяет улучшить механические свойства поверхности (температура, твердость, шероховатость, остаточные макронапряжения второго рода) и микроструктуру рессорно-пружинных марок стали.

Ключевые слова: комбинированная термическая, ультразвуковая и магнитно-импульсная обработки; стальные образцы; температура; режим; амплитуда; энергия импульса; количество импульсов; микроструктура; фазовые превращения; мартенсит; мелкозернистая структура; упрочнение.

Рис. 5. Библиогр.: 4 назв.

A. V. Alifanov¹, DSc in Technical Sciences, Professor,

V. V. Klubovich², Academician, DSc in Technical Sciences, Professor,

A. M. Miliukova³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,

V. V. Maleronok⁴, PhD in Technical Sciences, **O. A. Tolkachova**⁵, **E. B. Khrushchov**⁶

^{1,3,5} Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 10 Academician Kuprevich Str., 220084 Minsk, the Republic of Belarus, +375 (17) 367 60 10

¹ Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy, the Republic of Belarus

^{2,6} Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosti Ave., 220013 Minsk, the Republic of Belarus

⁴ Institution of Education “Belarusian State Aviation Academy”, 77 Ubovichy Str., 220096 Minsk, the Republic of Belarus

RESEARCH OF SPRING STEEL COMBINED PROCESSING TO INCREASE STRENGTH

Studies on the spring steels physical and mechanical properties before and after combined thermal, ultrasonic and magnetic pulse treatments under various modes have been carried out. It has been shown that the combined processing method under certain operating conditions makes it possible to improve the surface mechanical properties (temperature, hardness, roughness, the second kind residual macro stresses) and the microstructure of spring steel grades.

Key words: combined thermal, ultrasonic and magnetic pulse treatments; steel samples; temperature; mode; amplitude; pulse energy; number of pulses; microstructure; phase transformations; martensite; fine-grained structure; hardening.

Fig. 5. Ref.: 4 titles.

Введение. Учеными ФТИ НАН Беларуси, учреждения образования «Барановичский государственный университет» и Белорусского национального технического университета разработан комбинированный метод упрочнения поверхности стальных деталей, включающий кроме традиционной термической ультразвуковую обработку (далее — УЗ) и инновационную технологию воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние макронапряжения второго рода, измельчается и становится более однородной структура металла [1; 2]. Известно, что под воздействием магнитно-импульсной обработки (далее — МИО) на поверхности стального изделия образуется упрочненный слой толщиной 50...200 мкм [3]. Ультразвуковое воздействие приводит к наклепу и структурно-фазовым превращениям, повышению твердости поверхности детали [4]. Преимуществом МИО по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры изделия не меняются, шероховатость поверхности упрочненных изделий может уменьшиться, не требуются дополнительные финишные операции, а сам процесс отличается низким энергопотреблением, высокой производительностью, экологической чистотой.

Материалы и методы исследования. Для изготовления рессор и плоских пружин используют углеродистые и легированные стали, упрочняемые деформационным наклепом и мартенситным превращением. Применяемая для этого кремнистая сталь перлитного класса (60С2А), упрочняемая мартенситным превращением, имеет невысокий предел упругости, недостаточные релаксационную стойкость и длительную прочность, склонна к обезуглероживанию, росту зерна и обладает низкой прокаливаемостью. Такой комплекс свойств обусловлен химическим составом стали, в том числе наличием значительного количества кремния.

Хромомарганцевые стали (50ХГ) обладают лучшими технологическими свойствами. Совокупность хрома и марганца повышает прочностные характеристики стали при незначительном изменении пластических свойств. Добавка ванадия в хромомарганцевую сталь (50ХГФА) уменьшает ее чувствительность к перегреву, повышает устойчивость стали к отпуску за счет снижения коагуляции карбидной фазы. В результате сталь при высокой твердости обладает значительными пределами прочности, пропорциональности и упругости — при повышенной пластичности.

В ФТИ НАН Беларуси разработаны, изготовлены и применяются магнитно-импульсные установки (МИУ-2, МИУ-3, МИП-18 и др.) с различными технологическими возможностями, предназначенные для обработки металлических изделий импульсным электромагнитным полем различной напряженности и длительности. Для определения химического состава используемых образцов проводили их анализ на приборе «Спектролап М-5».

Температуру поверхности образцов до и после МИО измеряли за 1 с пирометром марки Testo 835-T1 в диапазоне от -20 до 600 °С с погрешностью измерения $1\% + 1$ °С, а также мультиметром ALEX 9808+ с термопарой ТХА с погрешностью измерения $\pm 1,5\%$ при температуре от -20 до $1\ 000$ °С. Шероховатость поверхности образцов Ra измеряли при помощи профилографа цехового с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем, модель 296. Внутренние остаточные макронапряжения второго рода и структурно-фазовый состав определяли методом рентгеновского структурного анализа с помощью дифрактометра GNR Explorer (Италия) при $\text{CuK}\alpha$ -излучении, шаге съемки $0,20^\circ$, времени интеграции 3 с. Металлографические исследования изменений микроструктуры образцов проводили на оптическом металлографическом комплексе МГК-1.

Результаты исследования и их обсуждение. Помимо варьирования химическим составом стали улучшение её свойств достигают применением различных способов термической обработки (ТО). Стандартная ТО пружинных сталей заключается в закалке на воду или масло и последующем отпуске. Температуру закалки и среду охлаждения выбирают в зависимости от марки используемой стали. После закалки микроструктура стали представляет собой мелкокристаллический мартенсит и (или) нижний бейнит твердостью 58...62 HRC. После отпуска твердость должна составлять не более 46 HRC, микроструктура — бейнит и карбиды.

Изотермическая закалка на нижний бейнит может обеспечить повышение сопротивления динамическому воздействию, повысить пластичность и вязкость материала. Так, после изотермической закалки стали 60С2А с выдержкой при 320 °С предел пропорциональности составляет 142 кг / мм² (1 390 МН / м²). Если после изотермической закалки проводить дополнительный отпуск, то значения предела пропорциональности и упругости повышаются.

Для достижения заданных свойств изделий из пружинных сталей в некоторых случаях следует проводить низко- или высокотемпературную термомеханическую обработку. При высокотемпературной термомеханической обработке фиксируется значительное упрочнение материала с сохранением и даже повышением пластических характеристик.

Данные анализа химического состава образцов из стали 50ХГФА представлены в таблице 1, из которой видно, что по составу они отвечают нормам ГОСТ 14959. Несколько заниженное содержание углерода и кремния обусловлено наличием окалины на образцах, представленных для исследования.

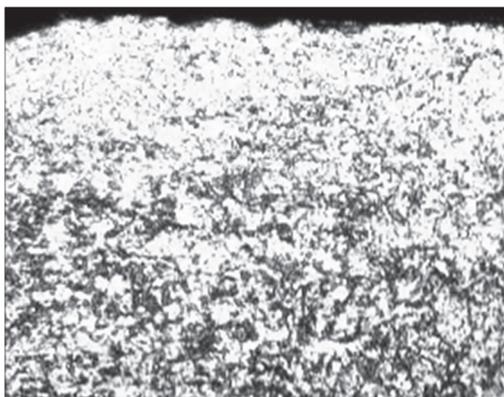
Т а б л и ц а 1. — Химический состав стали, %

Марка стали	Элементный состав								
	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	Cu	P	S
50ХГФА	0,35	0,164	0,864	0,896	0,207	0,082	0,03	0,014	0,028

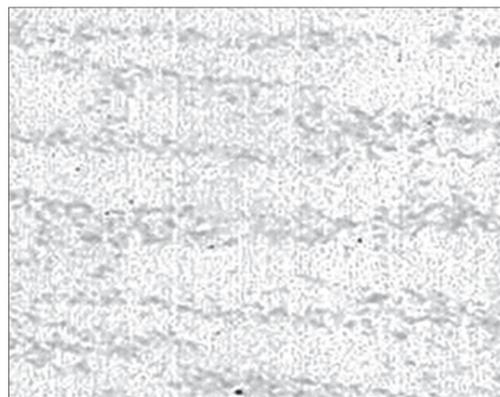
Микроструктура образцов рессорных полос из стали 50ХГФА представлена на рисунке 1. У поверхности полосы имеет место обезуглероженный слой с ферритной структурой (см. рисунок 1, а). Величина зоны обезуглероживания составляет до 80 мкм. Размер зерен феррита — 8 мкм. Микротвердость феррита — 2 040 МПа. За зоной обезуглероживания следует зона со структурой бейнита и небольшим количеством ферритных зерен. Толщина зоны составляет 940...1 200 мкм. По мере удаления от поверхности ферритная фаза исчезает, а размер зерен бейнитной составляющей увеличивается до 19 мкм. Значение микротвердости поверхностного феррита — 2 400 МПа, бейнита — 3 400 МПа. Микроструктура центральной части полосы — скрытокристаллический мартенсит с размером бывшего аустенитного зерна: вблизи поверхности — 8 мкм, в центре — 19 мкм (см. рисунок 1, б). Микротвердость мартенсита — 6 620 МПа. В центральной зоне на фоне скрытоигольчатого мартенсита выявляются участки крупно- и мелкоигольчатого бейнита (см. рисунок 1, в) в виде сильно травящихся игл, которые в плоскости шлифа располагаются полосами параллельно верхней и нижней поверхностям — так называемые полосы ликвации. Наличие полос ликвации обусловлено технологическими условиями изготовления рессорных полос, в том числе прокаткой.

При прокатке полос через рифленые валки на поверхности опытных образцов образуются параллельные линии вдавливания. Чем выше величина усилия P нанесения рельефа, тем меньше расстояние между этими линиями. При усилии $P = 2\ 887,5$ кг расстояние между линиями рельефа составляет 1 775 мкм, при $P = 12\ 705$ кг — 1 750 мкм, а при $P = 22\ 330$ кг — 1 725 мкм. В поперечном сечении образцов линии вдавливания имеют вид ямок (рисунок 2, а). Глубина ямки достигает 90 мкм. В соответствии с усилием воздействия изменяется микроструктура ближайших слоев. Так, при деформации усилием $P = 2\ 887,5$ кг толщина бейнитной зоны составляет около 900 мкм, при $P = 12\ 705$ кг — 930...1 500 мкм, при $P = 22\ 330$ кг — 1 750...2 300 мкм. Эти данные свидетельствуют о проявлении процесса смещения приповерхностных структурных зон в глубинные слои.

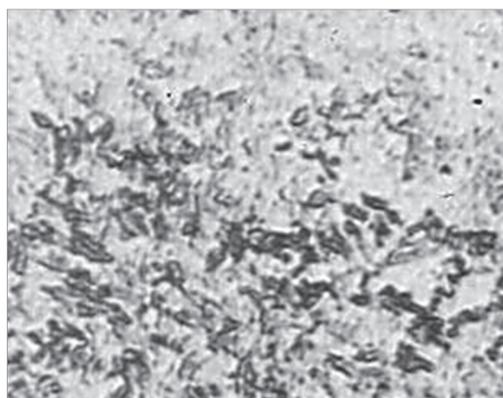
Микроструктура образцов с нанесенным на их поверхность рельефом представлена следующими структурными составляющими. Обезуглероживание поверхности составляет менее 50 мкм и не постоянно вдоль поверхности полосы. Размер ферритных зерен в обезуглероженном слое — 8 мкм. Микротвердость феррита — 2 580...2 850 МПа. Переходная зона представлена микроструктурой бейнита (см. рисунок 2, б). Толщина бейнитной зоны как по длине, так и по ширине рессорной полосы неравномерная. Данный факт объясняется условиями изготовления полос, в том числе закалкой в заневоленном состоянии. Размер зерен бейнитной фазы колеблется от 8 до 19 мкм. Микротвердость составляет 3 400...4 800 МПа.



а)



б)



в)

**Рисунок 1. — Микроструктура рессорной полосы стали 50ХГФА:
а — увеличение $\times 310$; б — $\times 310$; в — $\times 1500$**

Поскольку величина переходной зоны со структурой бейнита различная для всех исследуемых опытных образцов, количество мартенсита в структуре центральной части (см. рисунок 2, в, г) также различное. Структура — мартенсит скрытоигольчатый микротвердостью 6 000...7 700 МПа. Для всех структур имеет место наличие полос ликвации, в которых бейнитная составляющая крупноигольчатая.

Из данных микроструктурного анализа следует: основной структурной составляющей рессорных полос из стали 50ХГФА является мартенсит. Структура по толщине рессорной полосы слоистая: полосы скрытоигольчатого мартенсита чередуются с полосами крупноигольчатого (верхнего) бейнита. После отпуска закаленной стали структура дисперсного нижнего бейнита образуется только вдоль верхней поверхности рессорной полосы и занимает максимум $\frac{1}{4}$ часть от общей площади поперечного сечения, остальная часть сечения имеет структуру мартенсита.

Сравнивая эксплуатационные свойства сталей 60С2А и 50ХГФА, было решено для изготовления экспериментальных образцов выбрать сталь марки 50ХГФА. Подготовленные из стали 50ХГФА образцы исследовали в исходном состоянии, затем подвергали комбинированной упрочняющей обработке МИО и УЗ в различных комбинациях: УЗ и МИО по отдельности (образец I), сначала МИО, затем УЗ (образец II), сначала УЗ, затем МИО (образец III).

Исследованы свойства поверхности (твердость, шероховатость, остаточные макро-напряжения) и микроструктура закаленных по стандартной технологии образцов из рессорной стали 50ХГФА со следующими параметрами:

1) УЗ: частота — 21,8 кГц, амплитуда — 24 мкм, усилие прижима — 80...160 Н, подача продольная и поперечная, ручная со скоростью 0,5...0,7 м / мин, время обработки — 30...50 с (в БНТУ);

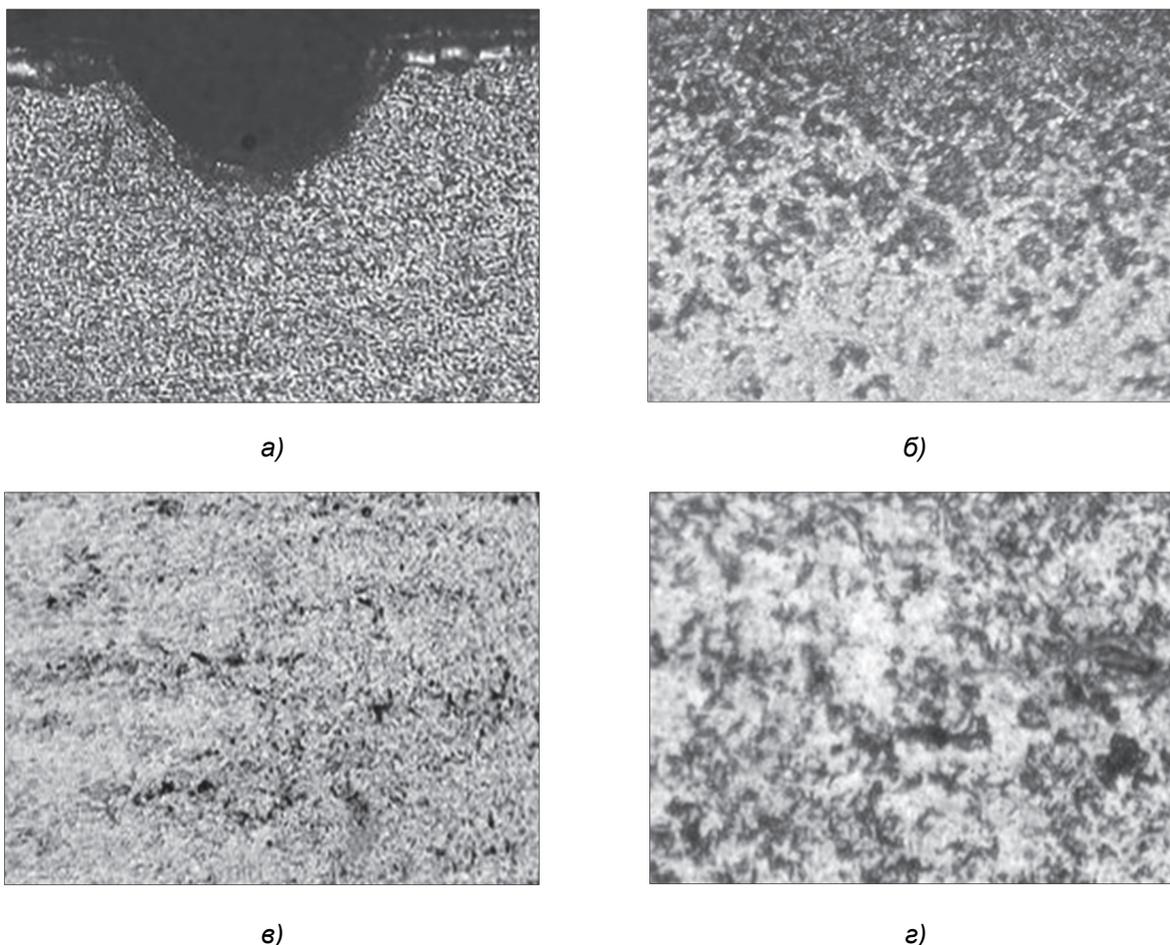


Рисунок 2. — Микроструктура рессорной полосы стали 50XГФА с нанесенным рельефом: а — увеличение $\times 310$; б — $\times 310$, в — $\times 310$; г — $\times 1500$

2) МИО производили на установке МИУ-3 по технологическим режимам: энергия — 8 кДж, 2 и 4 импульса (в ФТИ НАН Беларуси).

После каждой обработки измеряли твердость HRC, шероховатость Ra (при условиях измерения: шаг $l = 2,5$ мм, трасса = 6 мм, предел измерения 10) и остаточные суммарные макронапряжения 2-го рода поверхности.

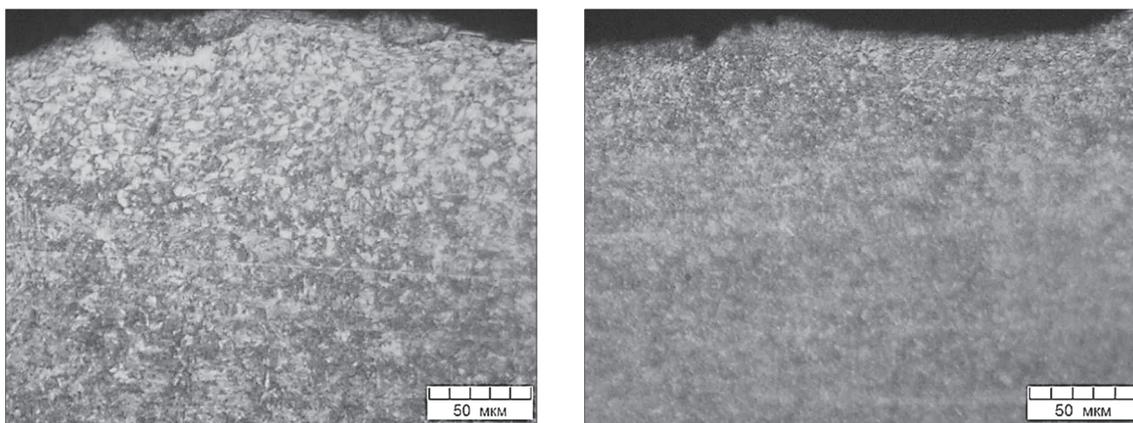
Среднее значение твердости закаленных образцов стали 50XГФА после МИО не изменилось, после УЗ + МИО увеличилось с 41...43 до 42...49 HRC, средняя шероховатость поверхности Ra после МИО снизилась незначительно (в пределах погрешности измерений 3 %), после УЗ — сильно снизилась с 7,3 до 1,42 мкм.

После ТО стальных образцов макронапряжения 2-го рода носят сжимающий характер, но после воздействия УЗ их не наблюдается. Однако после МИО величина сжимающих остаточных макронапряжений несколько возросла, что повышает прочность изделия.

Анализ микроструктуры образцов стали 50XГФА до и после комбинированной обработки при выбранных режимах показал, что основной структурной составляющей является мартенсит, а поверхностный обезуглероженный слой приобрел мелкозернистую структуру на глубину до 100 мкм.

На рисунках 3—5 представлены микроструктуры образцов I, II, III до и после упрочнения комбинацией УЗ и МИО в различной последовательности.

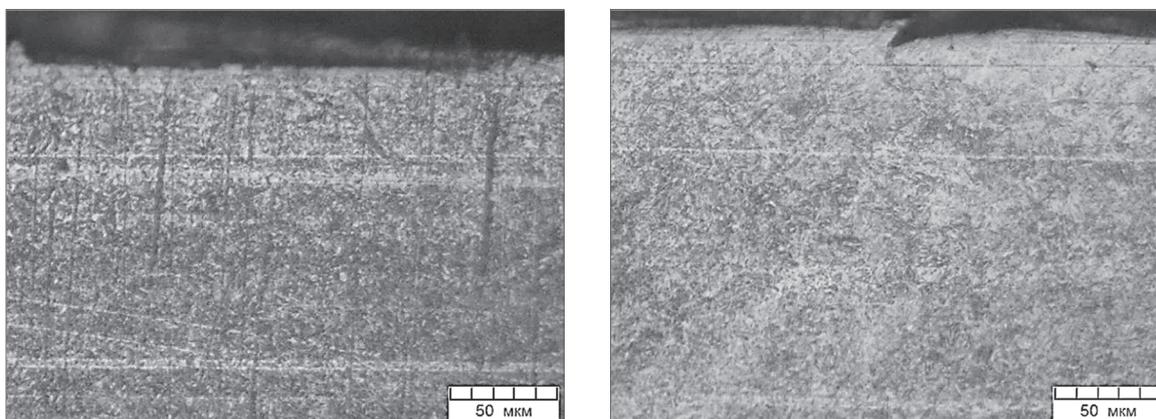
Структура образцов (мартенсит скрытоигольчатый) осталась неизменной в глубине исследованных образцов стали 50XГФА. На поверхности структура приобрела гомогенизированное состояние на глубину до 100 мкм, причем после применения УЗ сильно выражен наклеп.



а)

б)

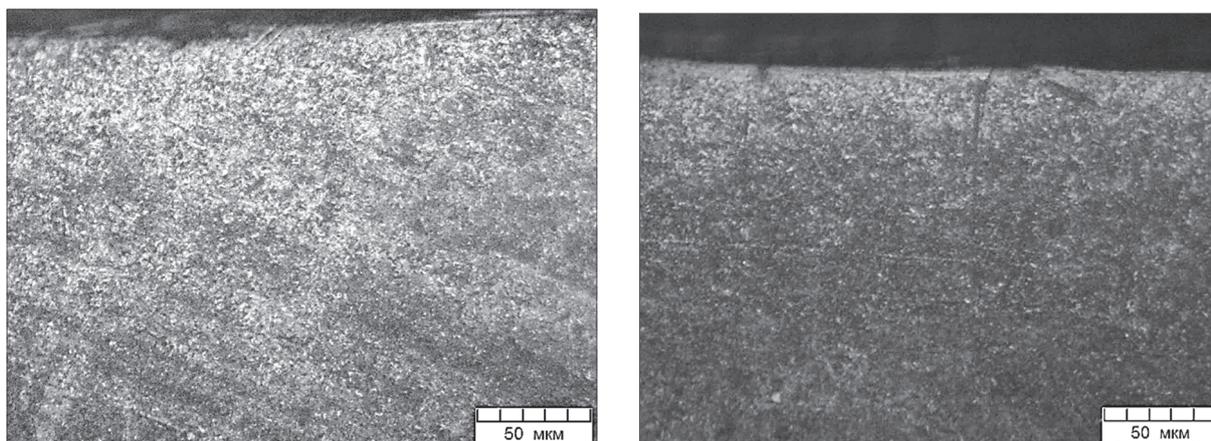
**Рисунок 3. — Микроструктура образца I стали 50ХГФА:
а — исходная; б — после МИО на МИУ-3 при режиме 8 кДж, 2 импульса**



а)

б)

**Рисунок 4. — Микроструктура образца II стали 50ХГФА:
а — исходная; б — после МИО на МИУ-3 при режиме 8 кДж, 2 импульса и затем УЗ**



а)

б)

**Рисунок 5. — Микроструктура образца III стали 50ХГФА:
а — исходная; б — после УЗ и затем МИО на МИУ-3 при режиме 8 кДж, 2 импульса**

Проведено упрочнение стальной пружины диаметром 20 мм с измерением коэффициента упругости до упрочнения и после. Расчеты показали, что, приравняв силу упругости (по закону Гука) (1) и силу тяжести (2), находим коэффициент упругости (3):

$$F_{\text{упр}} = k\Delta l, \quad (1)$$

где k — коэффициент упругости пружины;
 Δl — удлинение пружины;

$$F_m = mg, \quad (2)$$

где m — масса груза;
 g — ускорение свободного падения;

$$k = \frac{mg}{\Delta l}, \quad (3)$$

где $m = 1,144$ кг;
 $g = 9,8$ м / с²;
 $\Delta l = \Delta l_1 = 3,88 \cdot 10^{-3}$, м — модуль удлинения до упрочнения;
 $\Delta l = \Delta l_2 = 3,805 \cdot 10^{-3}$, м — модуль удлинения после упрочнения.

Подставив соответствующие значения в формулу (3), получим два значения коэффициентов упругости — до упрочнения $2,89 \cdot 10^3$ Н / м, после — $2,95 \cdot 10^3$ Н / м. Сравнение этих значений показывает, что произошло увеличение коэффициента упругости пружины, что указывает на появление упрочненного слоя в материале пружины.

Результаты проведенных исследований показывают возможность упрочняющей обработки проволочных пружин, что позволит повысить их эксплуатационные характеристики.

Учитывая, что упрочняющая обработка стальных пружин с применением ультразвукового воздействия является гораздо более сложной и затратной, чем упрочнение методом МИО, представляет практический интерес дальнейшее изучение возможностей и результативности магнитно-импульсной упрочняющей обработки.

Заключение. В целях разработки нового комбинированного метода упрочнения исследованы стальные образцы, которые после термообработки подвергнуты воздействию ультразвука и сильного импульсного электромагнитного поля с различными режимами в различной последовательности: УЗ, МИО, МИО + УЗ, УЗ + МИО. Анализ микроструктуры образцов стали 50ХГФА до и после комбинированной обработки при выбранных режимах показал, что основной структурной составляющей является мартенсит, поверхностный обезуглероженный слой приобрел мелкозернистую структуру на глубину до 100 мкм. Микроструктура образцов (мартенсит скрытоигольчатый) осталась неизменной в глубине исследованных образцов стали 50ХГФА. На поверхности структура приобрела гомогенизированное состояние на глубину до 100 мкм, причем после применения УЗ сильно выражен наклеп.

Учитывая, что упрочняющая обработка стальных пружин с применением ультразвукового воздействия является гораздо более сложной и затратной, чем упрочнение методом МИО, представляет практический интерес дальнейшее изучение возможностей и результативности магнитно-импульсной упрочняющей обработки. Результаты исследований показывают возможности комбинированного метода упрочнения рессор, пружин из стали 50ХГФА, что позволит повысить их эксплуатационные характеристики.

Список цитированных источников

1. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3. — С. 77—82.
2. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка материалов / А. В. Алифанов [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов* : сб. науч. тр. : в 2 кн. — Минск : ФТИ НАН Беларуси, 2021. — Кн. 1, Новые технологии и материалы / редкол.: В. Г. Залесский (гл. ред.) [и др.]. — С. 127—153.
3. *Алифанов, А. В.* Механизм упрочнения легированных сталей в импульсном магнитном поле / А. В. Алифанов, Ж. А. Попова, Н. М. Ционенко // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 4. — С. 25—35.
4. *Алифанов, А. В.* Технологии изготовления и упрочнения высоконагруженных деталей машиностроения / А. В. Алифанов, А. М. Милукова, В. А. Томило. — Минск : Беларус. навука, 2014. — 321 с.

Поступила в редакцию 28.03.2024.