

УДК 621.9

И. А. Горавский¹, А. Н. Жигалов², доктор технических наук, доцент

^{1,2}Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

²Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук
Беларуси», ул. Бялыницкого-Бирули, 11, 212030 Могилев, Республика Беларусь, +375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

УСТРАНЕНИЕ СТРОЧЕЧНОСТИ В БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЯХ Р6М5 МЕТОДОМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Показано, что при аэродинамическом звуковом методе, основанном на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансным воздействием акустических волн в звуковом спектре частот, на структуру быстрорежущей стали Р6М5, обеспечивается устранение погрешности структуры в виде строчечности и сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз.

Ключевые слова: метод аэродинамического звукового воздействия; быстрорежущая сталь Р6М5; строчечность структуры.

Рис. 8. Табл. 5. Библиогр.: 10 назв.

I. A. Goravskii¹, A. N. Jigalov², DSc in Technical Sciences, Associate Professor

^{1,2}Institution of Education “Baranavichy State University”, 21 Voykova Str., 225404 Baranavichy,
the Republic of Belarus

²State Scientific Institution “Institute of Technology of Metals of National Academy of Sciences of Belarus”,
11 Byalynitskogo-Biruli Str., 212030 Mogilev, the Republic of Belarus, + 375 (29) 630 15 17, jigalov6@mail.ru

ELIMINATION OF SCRIBBLING IN HIGH-SPEED P6M5 STEELS BY THE AERODYNAMIC SOUND EFFECT METHOD

It is shown that with the aerodynamic sound method based on the high-energy low-temperature effect of energy created by the resonant effect of acoustic waves in the sound frequency spectrum on the structure of high-speed steel P6M5, the structural errors elimination in the form of stitching and oriented along the axis of deformation of carbide phases is ensured.

Key words: the method of aerodynamic sound effect; high-speed steel R6M5; the structure linearity.

Fig. 8. Table 5. Ref.: 10 titles.

Введение. Основным способом получения прутковых полуфабрикатов из быстрорежущих сталей является горячая прокатка. Этот способ наиболее дешевый, в отличие от порошкового спекания. Однако при способе горячей прокатки быстрорежущих сталей из-за особенностей строения данного вида сталей в структуре происходят изменения вдоль направления прокатки, что серьезным образом сказывается на снижении прочностных свойств получаемых прутковых быстрорежущих сталей. Известно, что сориентированные вдоль оси деформации карбидные фазы приводят к анизотропии объемных изменений и возрастанию уровня термических напряжений, вызванных явлением фазового наклепа [1].

Наличие строчечности вдоль оси проката и неравномерное распределение карбидов по сечению проката являются существенными недостатками инструментальной стали Р6М5 при поставке в виде горячекатаных прутков, которые широко используются для изготовления металлорежущего, штампового и холодновысадочного инструмента. Такая структурная неоднородность снижает прочностные характеристики металлорежущего инструмента, особен-

но работающего со значительными ударными нагрузками. Например, на таких технологических операциях, как вырубка, пробивка, редуцирование, выдавливание, наличие строчечности приводит к повышению чувствительности к усталостному выкрашиванию инструмента из быстрорежущих сталей Р6М5 [2—6]. Опасность наличия строчечности связана с тем, что если в инструменте линии строчечности будут направлены поперек режущего зуба, то металл ослабевает, при наличии значительных поперечных нагрузок, связанных с ударом, произойдет выкрашивание зуба.

Известно, что на прочностные свойства быстрорежущих сталей заметное влияние оказывает содержание углерода в мартенсите, объемная доля вторичных карбидов, их дисперсность и распределение. На показатели вязкости влияют величина зерна, форма и дисперсность карбидов [7].

Известен метод аэродинамического звукового упрочнения (далее — АДУ), способный повысить ударную вязкость материала при сохранении высокой твердости, в результате чего повышается стойкость инструмента, работающего при процессах прерывистого резания. Метод АДУ основан на принципах изменения структуры упрочняемого изделия за счет воздействия энергии резонансных волн в звуковом спектре частот [8; 9].

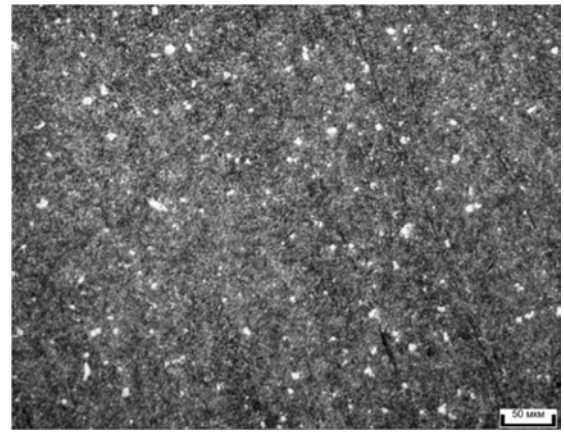
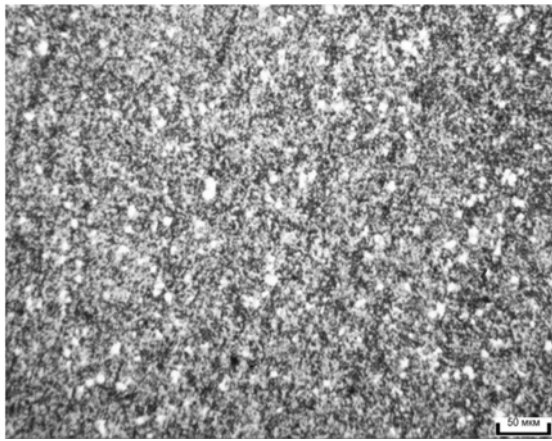
Актуальным является проведение исследований влияния метода АДУ на изменения строчечности в быстрорежущей стали Р6М5, так как инструмент, изготавливаемый из такой стали, весьма подвержен воздействию ударных нагрузок, влияние строчечности при этом весьма велико, а также в связи с тем, что ранее такие исследования не проводились.

Материалы и методы исследования. В установке АДУ упрочняли по методике [10] образцы из стали Р6М5: № 2 — на режиме 1 (давление подаваемого в камеру воздуха — 0,16 МПа, резонансная частота — 154 Гц); № 3 — на режиме 2 (давление подаваемого в камеру воздуха — 0,16 МПа, резонансная частота — 168 Гц); № 4 — на режимах 1 и 2. Перед каждым режимом упрочнения образцы нагревались до температуры 280 °С. Время упрочнения на режимах: 1-м — 3 мин, 2-м — 3 мин. Образец № 1 оставался неупрочненным.

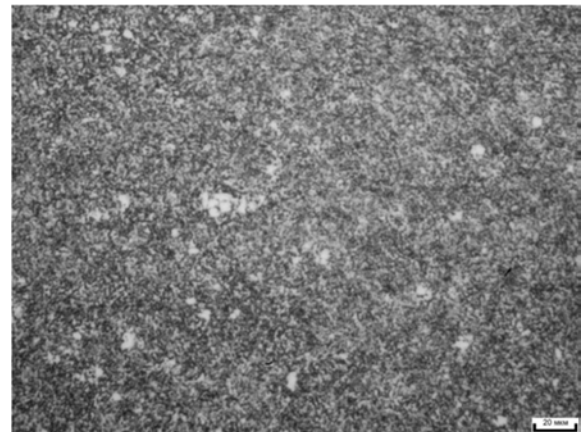
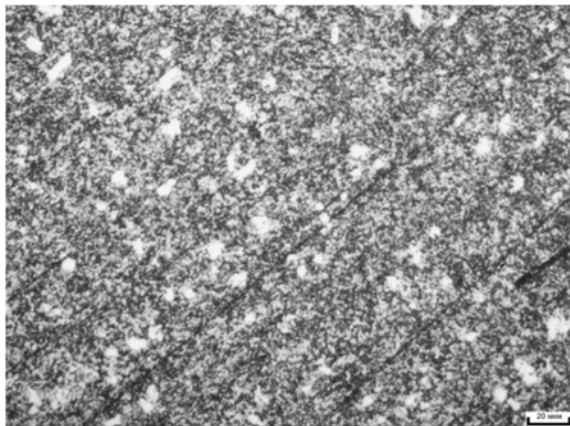
Исследование морфологии и элементного состава проводили на сканирующем электронном микроскопе MIRA фирмы Tescan (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания). Микроскоп оснащен детекторами вторичных электронов SE и обратно отраженных электронов BSE, которые позволяют проводить исследование образцов в двух режимах. Съёмка структуры велась в двух режимах: в режиме вторичных электронов SE и обратно отраженных электронов BSE. В поперечном сечении наблюдается локальное скопление карбидов. Как и в продольном сечении образца, скопления карбидов сосредоточены в середине образца, к периферии образца они уменьшаются. При съёмке образцов в режиме вторичных электронов (SE) контраст на изображении создается за счет отражения электронного пучка от поверхности образца (т. е. создается само изображение). В случае исследования при помощи детектора обратно отраженных электронов (BSE) контраст на картинке создается за счет разности атомных номеров исследуемых объектов, т. е. чем выше атомный номер элемента, тем светлее (белее) изображение. Атомные номера Mo, W больше атомных номеров V, Cr, Mn, Fe. Поэтому на фотографиях структуры, содержащие больше Mo, W, белого цвета, а структуры, содержащие их мало, темного цвета.

Результаты исследования и их обсуждение. На рисунке 1 представлена структура стали Р6М5 без упрочнения (а) и с АДУ (б).

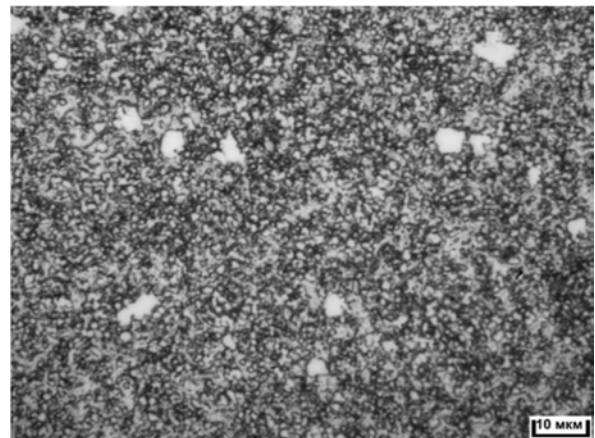
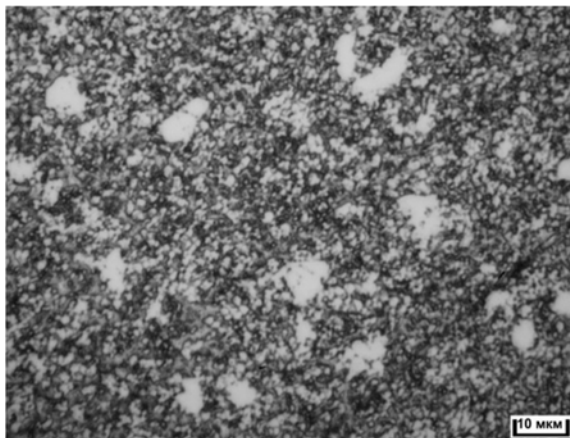
Установлен следующий элементный состав в исследованных образцах: Si — 0,2 %, V — 2,0 %, Cr — 4,3 %, Mo — 5,4 %, W — 6,7 %, Mn — 0,3 %, Ni — 0,2 %, Co — менее 0,1 %, суммарное содержание других примесей не превышает 0,3 %, Fe — основа. По элементному составу с учетом погрешности измерений материал образца соответствует быстро-режущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73 «Прутки и полосы из быстрорежущей стали»).



x100



x200



x500

a)

б)

Рисунок 1. — Структура стали Р6М5 без упрочнения (а) и с АДУ (б)

Анализ структурного состояния образцов стали Р6М5 с АДУ (см. рисунок 1, б) показывает, что строчечность в продольном направлении значительно уменьшается по сравнению с образцами в исходном состоянии (см. рисунок 1, а).

На приведенных снимках образцов из стали Р6М5 без упрочнения (см. рисунок 1, а) видно явное присутствие продольных деформационных линий, которые образовались при горячей прокатке круглого профиля.

На рисунке 2 представлены результаты микроструктуры продольных сечений образцов № 1...4 при различных увеличениях.

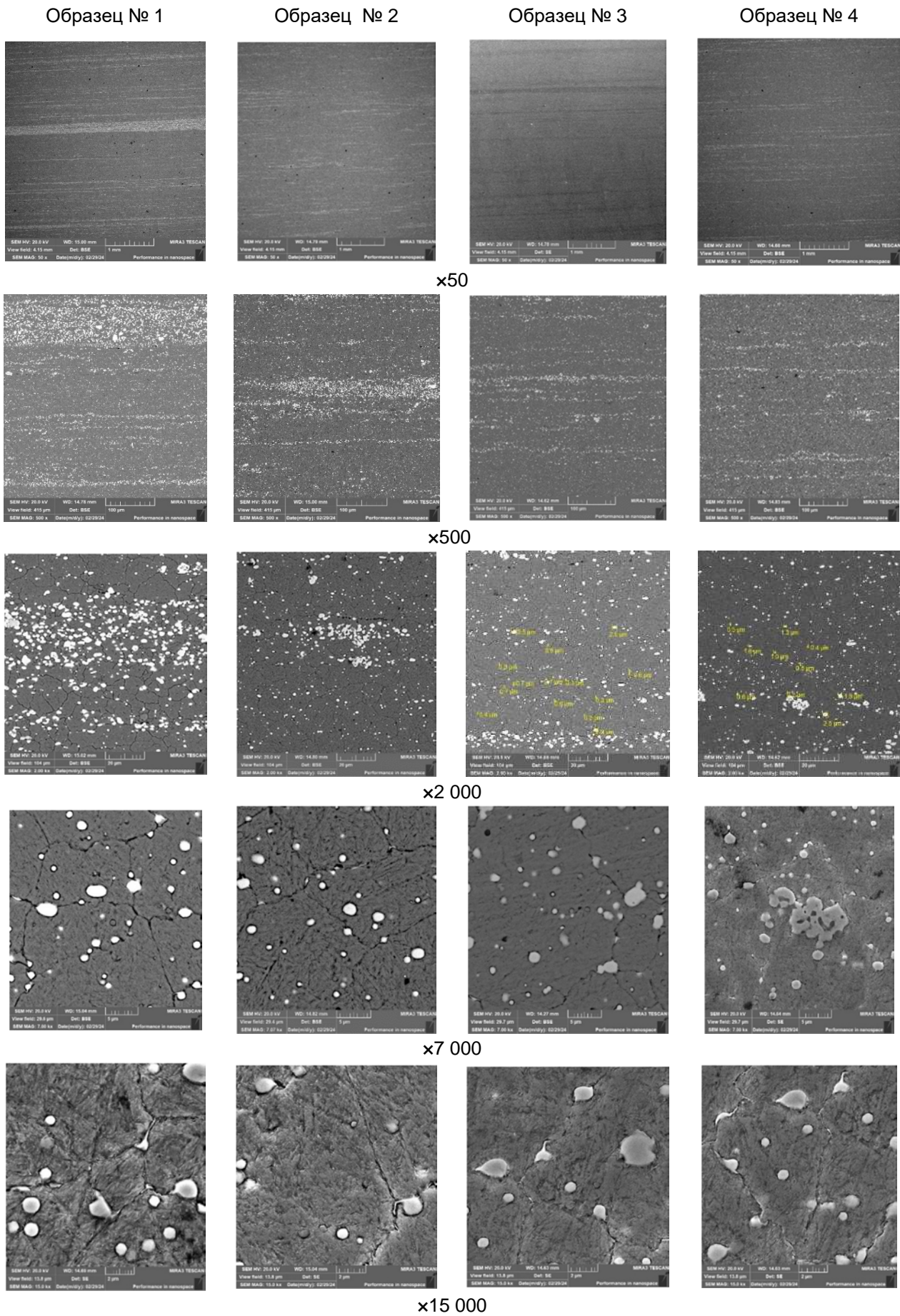


Рисунок 2. — Структура образцов № 1...4 из стали P6M5 в продольном сечении

В структуре продольного сечения образца № 1 (с.м. рисунок 2) присутствует строчечность. Элементный состав на различных участках отличается. В строчечности повышено содержание карбидов Cr, Mo и W. Строчечность в основном наблюдается в середине образца, к периферии образца она уменьшается.

На рисунке 3 представлены поперечные сечения образцов № 1...4.

Как видно из рисунка 3, строчечность в поперечном сечении отсутствует во всех исследуемых образцах.

Микрорентгеноспектральные результаты по структурным составляющим и химическому составу в продольных сечениях образца № 1 представлены на рисунке 4, в таблице 1, рисунке 5, таблице 2, образца № 2 — рисунке 6, таблице 3, образца № 3 — рисунке 7, таблице 4, образца № 4 — рисунке 8, таблице 5.

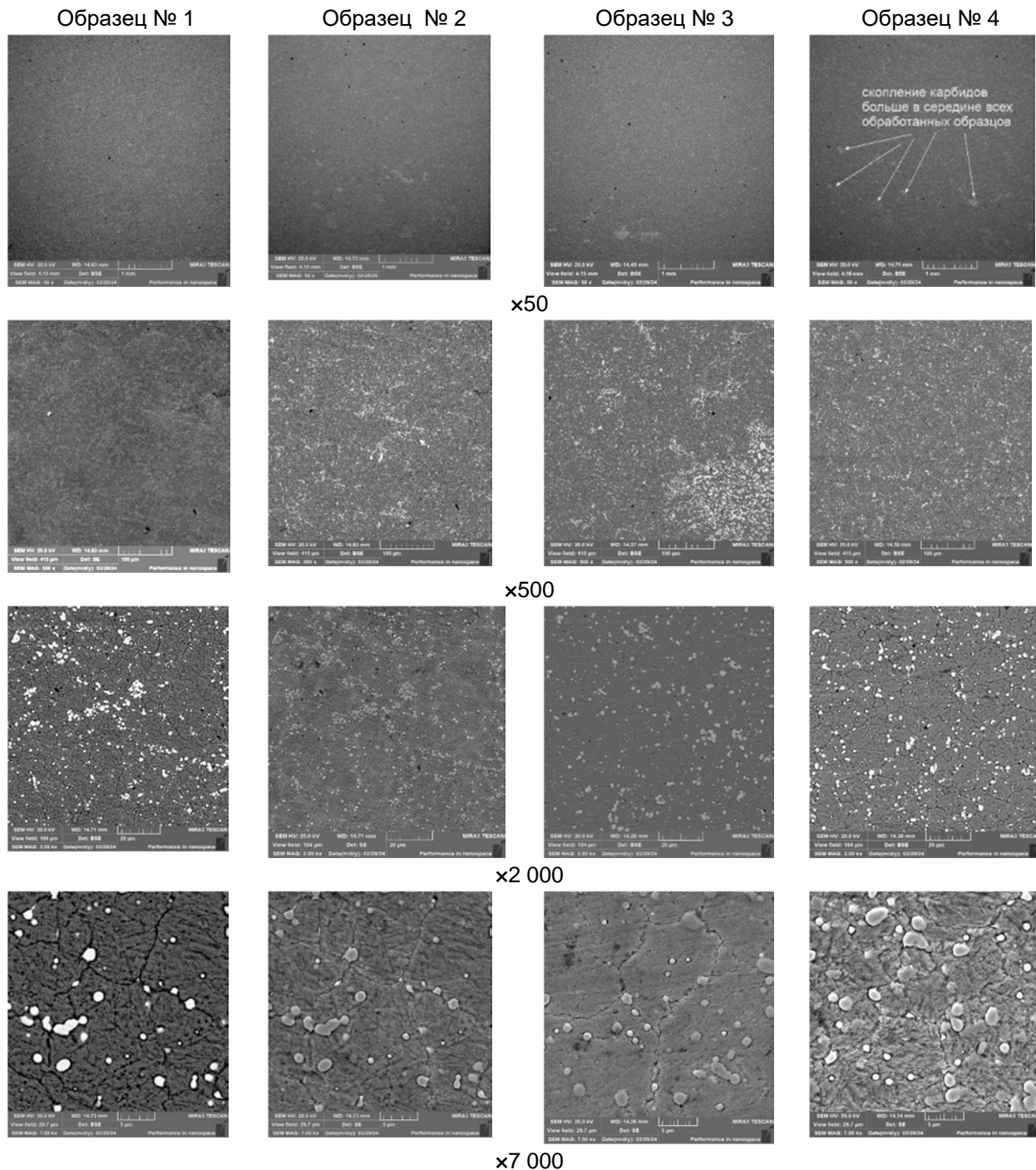


Рисунок 3. — Структура образцов № 1...4 из P6M5 в поперечном сечении

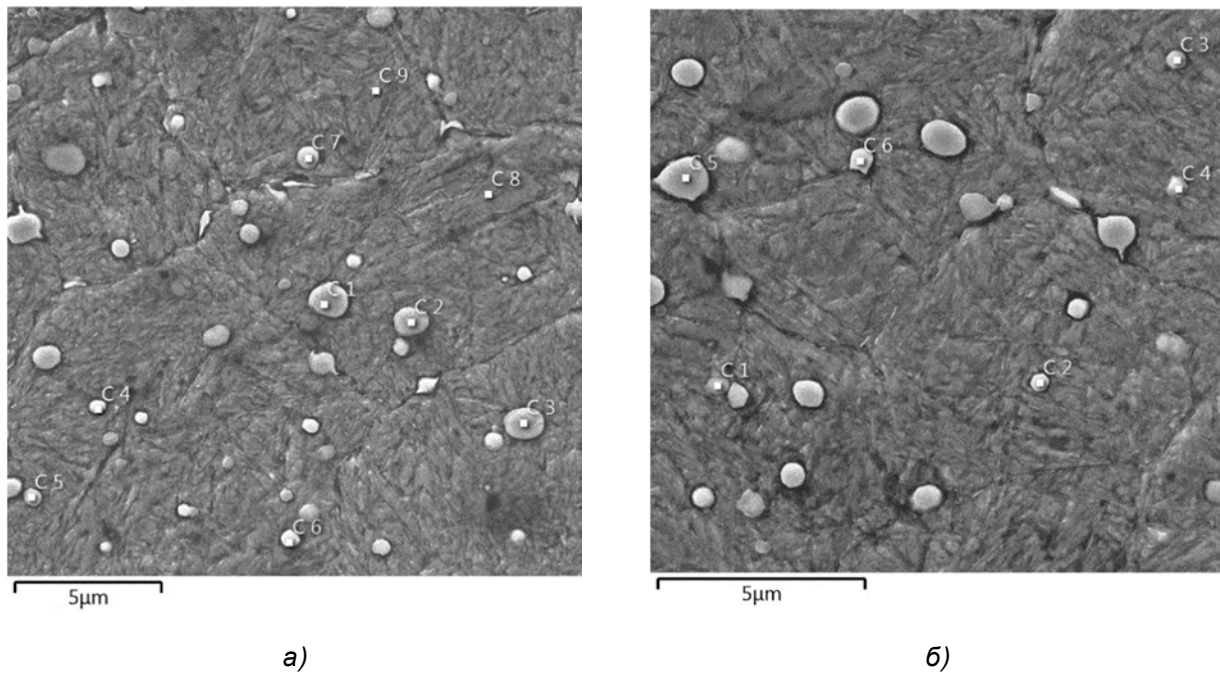
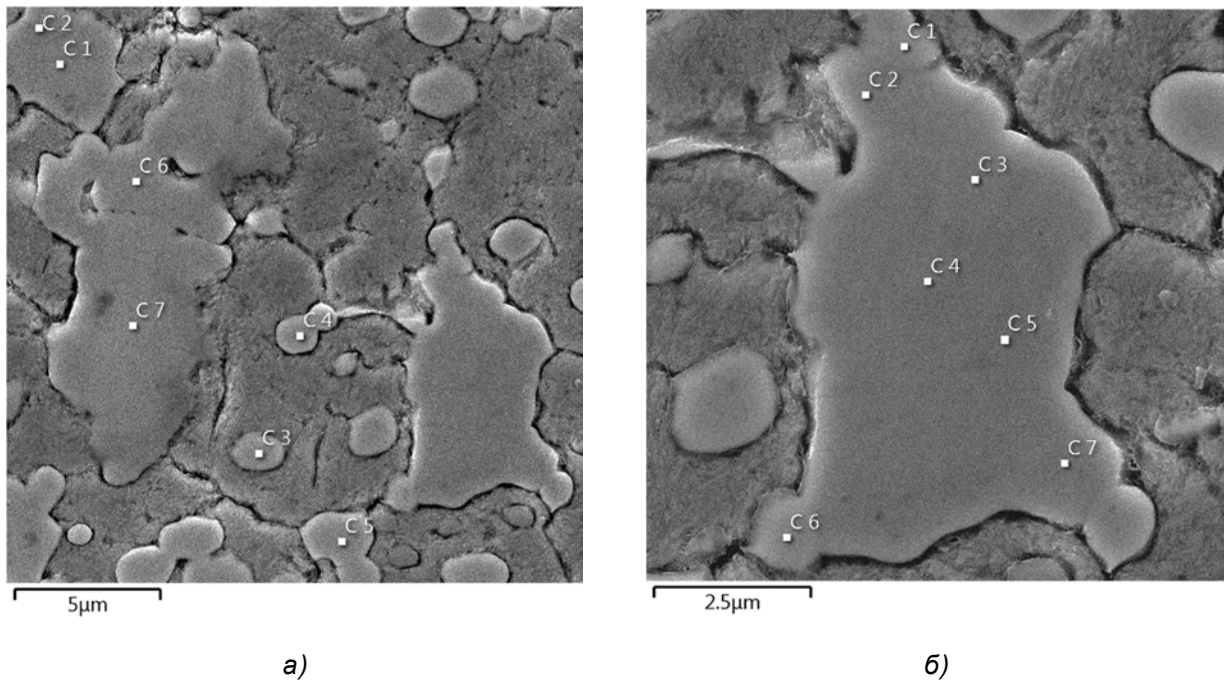


Рисунок 4. — Структура образца № 1 из Р6М5 при $\times 7\ 000$ на разных участках (а) и (б)

Т а б л и ц а 1. — Значения элементов в образце № 1 из стали Р6М5, %

Номер спектра	Si	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	W	Fe
C1, а	0,0	3,0	3,1	0,3	0,0	0,0	0,3	23,7	38,5	Остальное
C2, а	0,0	2,6	3,3	0,2	0,1	0,1	0,4	21,1	36,5	Остальное
C3, а	0,0	2,8	3,4	0,1	0,0	0,2	0,1	21,7	39,3	Остальное
C4, а	0,0	2,9	2,9	0,3	0,0	0,0	0,0	21,2	35,8	Остальное
C5, а	0,0	2,1	3,3	0,1	0,1	0,0	0,0	17,2	30,7	Остальное
C6, а	0,0	2,9	3,5	0,1	0,3	0,2	0,0	19,8	36,7	Остальное
C7, а	0,0	3,0	3,1	0,1	0,2	0,0	0,0	19,6	35,0	Остальное
C8, а	0,2	1,3	4,0	0,4	0,4	0,0	0,3	3,7	3,5	Остальное
C9, а	0,1	1,4	4,0	0,3	0,1	0,3	0,1	3,8	5,6	Остальное
C1, б	0,0	2,4	3,3	0,3	0,0	0,1	0,0	21,0	35,7	Остальное
C2, б	0,0	2,4	3,3	0,3	0,0	0,3	0,0	14,4	29,1	Остальное
C3, б	0,0	2,2	3,8	0,3	0,0	0,0	0,3	13,0	23,5	Остальное
C4, б	0,0	2,1	3,6	0,1	0,0	0,0	0,0	13,4	23,3	Остальное
C5, б	0,0	3,0	2,8	0,1	0,0	0,0	0,0	23,1	40,3	Остальное
C6, б	0,0	2,5	3,4	0,1	0,0	0,5	0,3	19,7	35,2	Остальное



**Рисунок 5. — Структура образца № 1 из P6M5
при $\times 7\ 000$ (а), $\times 15\ 000$ (б)**

Т а б л и ц а 2. — Значения элементов в образце № 1 из стали P6M5, %

Номер спектра	Si	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	W	Fe
C1, а	0,0	7,1	6,5	0,1	0,3	0,1	0,1	31,7	31,1	Остальное
C2, а	0,0	14,6	9,2	0,0	0,0	0,0	0,1	39,6	32,4	Остальное
C3, а	0,0	14,9	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0	39,8	31,7	Остальное
C4, а	0,0	12,2	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	43,4	28,7	Остальное
C5, а	0,0	9,1	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	46,1	24,3	Остальное
C6, а	0,0	4,0	5,3	0,4	0,0	0,0	0,0	29,9	29,5	Остальное
C7, а	0,0	14,9	9,9	0,0	0,1	0,0	0,0	38,0	32,4	Остальное
C1, б	0,0	7,1	6,5	0,1	0,3	0,1	0,1	31,7	31,1	Остальное
C2, б	0,0	14,6	9,2	0,0	0,0	0,0	0,1	39,6	32,4	Остальное
C3, б	0,0	14,9	9,2	0,0	0,0	0,0	0,0	39,8	31,7	Остальное
C4, б	0,0	12,2	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	43,4	28,7	Остальное
C5, б	0,0	9,1	15,3	0,0	0,0	0,0	0,0	46,1	24,3	Остальное
C6, б	0,0	4,0	5,3	0,4	0,0	0,0	0,0	29,9	29,5	Остальное
C7, б	0,0	14,9	9,9	0,0	0,1	0,0	0,0	38,0	32,4	Остальное

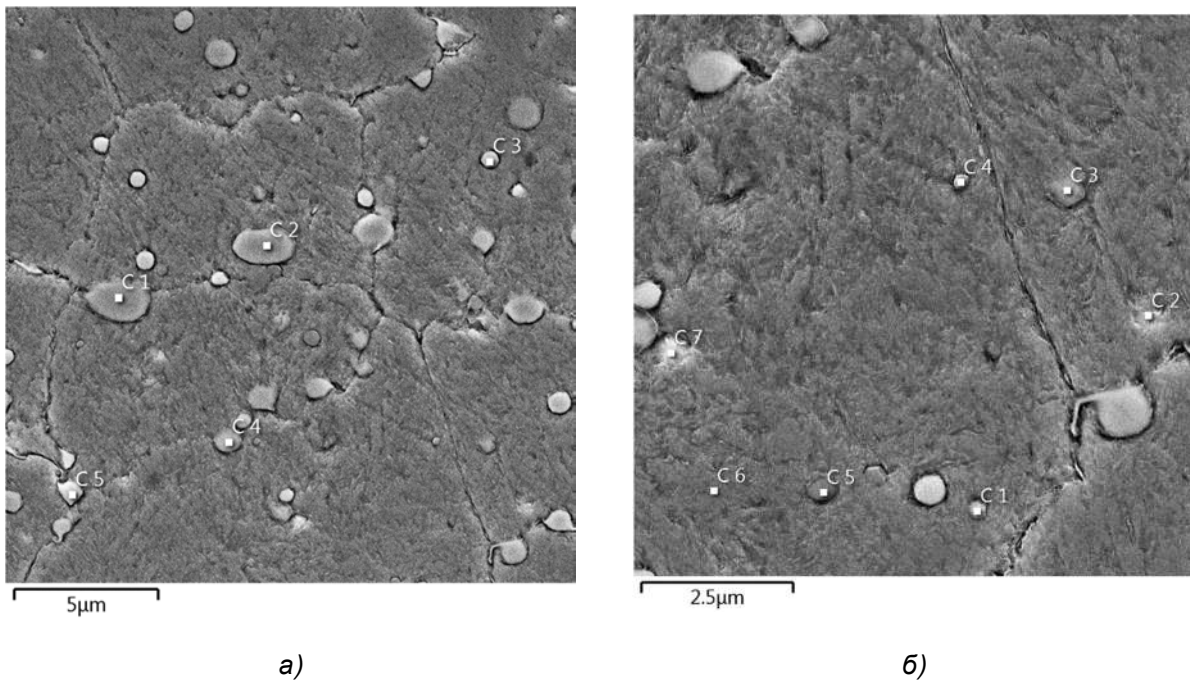


Рисунок 6. — Структура образца № 2 из Р6М5 при $\times 7\ 000$ на участках (а) и (б)

Т а б л и ц а 3. — Значения элементов в образце № 2 из стали Р6М5, %

Номер спектра	Si	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	W	Fe
C1, а	0,0	3,3	3,1	0,2	0,0	0,0	0,2	21,8	39,6	Остальное
C2, а	0,0	3,0	3,3	0,0	0,4	0,0	0,0	20,2	39,8	Остальное
C3, а	0,0	2,6	3,3	0,4	0,0	0,0	0,3	18,2	33,0	Остальное
C4, а	0,0	2,3	3,8	0,0	0,2	0,0	0,2	17,7	33,7	Остальное
C5, а	0,0	2,6	3,2	0,0	0,0	0,0	0,3	20,2	35,7	Остальное
C1, б	0,0	2,6	4,5	0,3	0,0	0,1	0,2	14,2	25,5	Остальное
C2, б	0,0	3,0	4,0	0,0	0,2	0,0	0,0	19,6	33,3	Остальное
C3, б	0,0	1,8	3,7	0,2	0,5	0,5	0,1	10,7	19,9	Остальное
C4, б	0,0	11,9	4,2	0,1	0,1	0,4	0,0	8,7	14,2	Остальное
C5, б	0,0	13,0	5,1	0,0	0,5	0,3	0,0	7,2	10,5	Остальное
C6, б	0,1	1,3	4,6	0,5	0,0	0,0	0,0	3,3	4,1	Остальное
C7, б	0,0	3,0	3,6	0,0	0,0	0,3	0,4	20,2	34,9	Остальное

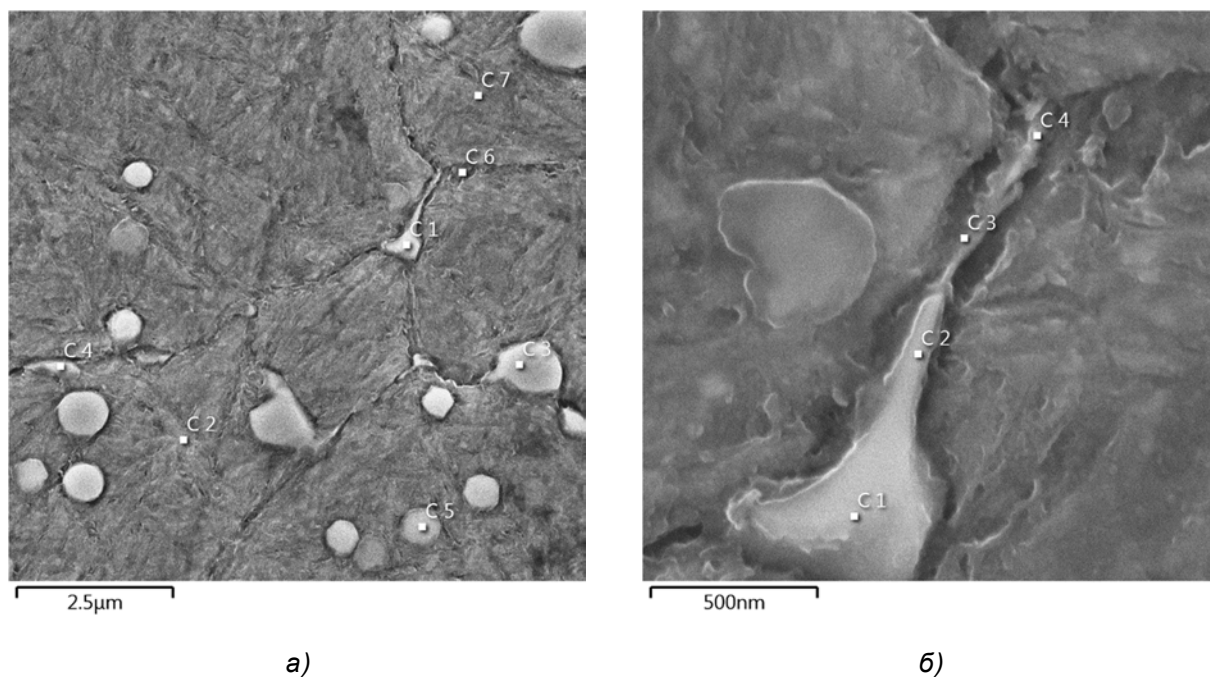


Рисунок 7. — Структура образца № 3 из P6M5 при $\times 15\,000$ (а), $\times 80\,000$ (б)

Т а б л и ц а 4. — Значения элементов в образце № 3 из стали P6M5, %

Номер спектра	Si	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	W	Fe
C1, а	0,0	2,7	3,3	0,0	0,2	0,3	0,0	22,50	32,50	Остальное
C2, а	0,0	2,8	3,9	0,1	0,2	0,4	0,4	16,80	26,60	Остальное
C3, а	0,0	3,4	3,2	0,1	0,1	0,0	0,0	24,80	38,30	Остальное
C4, а	0,0	1,8	3,9	0,1	0,5	0,2	0,1	12,70	20,00	Остальное
C5, а	0,0	2,0	3,7	0,0	0,2	0,0	0,4	13,70	25,00	Остальное
C6, а	0,2	1,1	4,3	0,3	0,4	0,0	0,0	2,70	3,50	Остальное
C7, а	0,1	1,4	4,2	0,2	0,3	0,2	0,0	3,68	4,38	Остальное
C1, б	0,0	2,5	4,0	0,0	0,0	0,0	0,1	21,60	31,60	Остальное
C2, б	0,2	2,0	4,3	0,3	0,2	0,3	0,3	11,40	17,40	Остальное
C3, б	0,0	1,8	4,5	0,5	0,5	0,3	0,1	8,10	10,20	Остальное
C4, б	0,3	1,4	5,2	0,4	0,0	0,4	0,0	9,70	12,28	Остальное

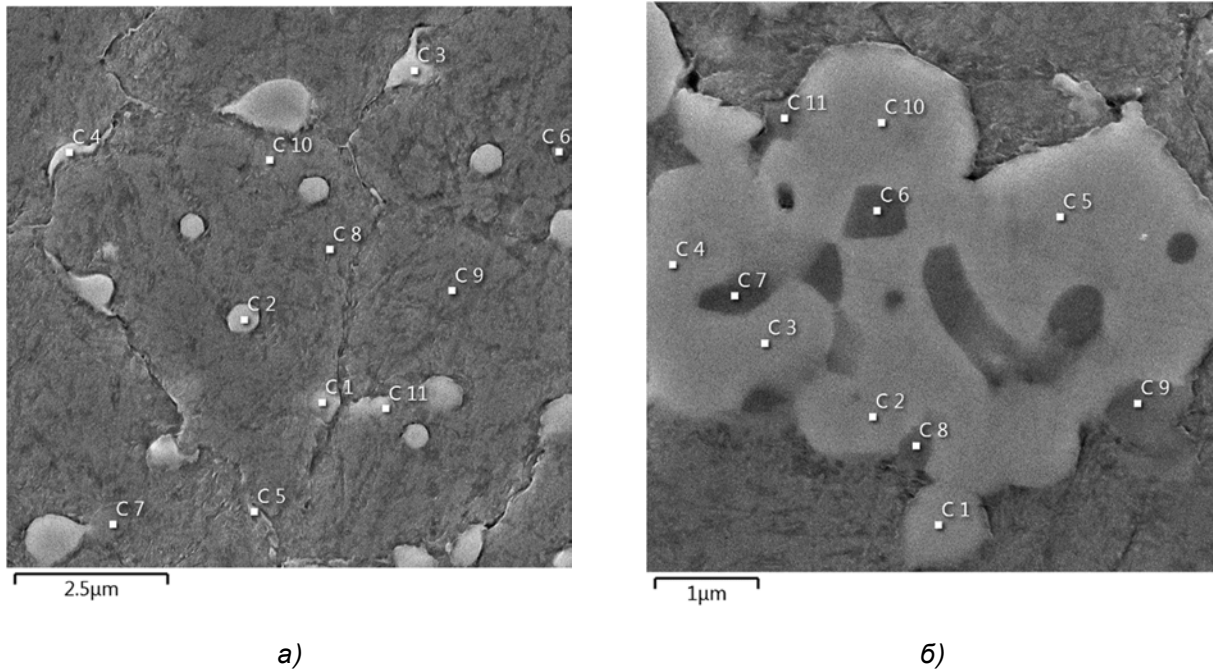


Рисунок 8. — Структура образца № 4 из Р6М5 на участках при $\times 15\ 000$ (а), $\times 25\ 000$ (б)

Т а б л и ц а 5. — Значения элементов в образце № 4 из стали Р6М5, %

Номер спектра	Si	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Mo	W	Fe
C1, а	0,0	3,3	3,5	0,2	0,2	0,0	0,0	20,9	36,3	Остальное
C2, а	0,0	3,0	3,3	0,1	0,0	0,1	0,0	16,5	32,0	Остальное
C3, а	0,0	3,2	3,6	0,0	0,3	0,3	0,0	22,1	37,0	Остальное
C4, а	0,0	3,1	3,2	0,0	0,4	0,0	0,0	20,5	33,4	Остальное
C5, а	0,3	3,8	3,9	0,4	0,4	0,0	0,0	4,1	5,5	Остальное
C6, а	0,1	15,7	4,3	0,2	0,0	0,00	0,2	8,1	11,3	Остальное
C7, а	0,2	4,5	4,0	0,1	0,2	0,10	0,0	4,3	5,9	Остальное
C8, а	0,2	1,2	4,2	0,2	0,1	0,4	0,1	3,5	4,7	Остальное
C9, а	0,4	1,2	3,7	0,5	0,1	0,0	0,0	3,2	4,0	Остальное
C10, а	0,0	2,3	4,0	0,1	0,3	0,0	0,0	13,3	19,2	Остальное
C11, а	0,2	1,5	4,0	0,3	0,0	0,2	0,3	6,9	11,4	Остальное
C1, б	0,0	2,3	3,8	0,4	0,5	0,0	0,1	16,4	26,5	Остальное
C2, б	0,2	6,4	3,6	0,2	0,0	0,0	0,1	24,5	34,3	Остальное
C3, б	0,0	5,8	3,6	0,0	0,2	0,1	0,1	24,4	35,84	Остальное
C4, б	0,0	4,3	2,8	0,3	0,2	0,0	0,2	24,2	36,98	Остальное
C5, б	0,0	4,7	3,0	0,0	0,2	0,2	0,0	25,1	34,8	Остальное
C6, б	0,0	29,7	3,8	0,3	0,1	0,0	0,0	20,4	27,4	Остальное
C7, б	0,0	29,1	4,9	0,0	0,23	0,22	0,0	20,9	27,1	Остальное
C8, б	0,0	18,1	3,7	0,3	0,4	0,1	0,0	19,0	23,8	Остальное
C9, б	0,0	26,8	3,8	0,2	0,4	0,0	0,1	18,6	23,4	Остальное
C10, б	0,0	3,5	3,1	0,2	0,0	0,0	0,0	23,0	35,7	Остальное
C11, б	0,2	34,9	4,9	0,5	0,2	0,2	0,0	15,1	17,0	Остальное

Анализ микрорентгеноспектральных результатов по структурным составляющим продольных сечений образцов № 1...4, представленных на рисунках 4...8 и в таблицах 1...5, показал, что в образцах № 2...4 происходит устранение строчечности, она становится разорванной, измельчается зерно, в поперечном сечении мелкое зерно. В образце № 2 происходит рекристаллизация, карбиды становятся четко между границами зерен. В образце № 1 имеются между границами зерен хорошо заметные трещины, в остальных образцах их нет. В образцах № 2...4 измельчается карбидное зерно. В образце № 3 наблюдаются большие деформированные карбиды с содержанием ванадия. У упрочненных образцов № 2...4 идет распределение мелкодисперсных карбидов, зерно начинает дробиться, скопление карбидов в середине упрочненных образцов больше, чем у края.

Заключение. Установлено, что метод АДУ, основанный на высокоэнергетическом низкотемпературном воздействии энергии, созданной резонансным воздействием акустических волн в звуковом спектре частот, при воздействии на быстрорежущую сталь Р6М5 позволяет обеспечивать устранение погрешности структуры в виде строчечности и сориентированных вдоль оси деформации карбидных фаз.

Список цитируемых источников

1. *Околович, Г. А.* Штамповые стали для холодного деформирования металлов : монография / Г. А. Околович. — Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2010. — 202 с.
2. *Башаров, Р. Р.* Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка / Р. Р. Башаров, Р. Г. Кудояров // Вестник УГАТУ. — 2012. — Т. 16, № 4 (49). — С. 71—77.
3. *Безьязычный, В. Ф.* Обеспечение показателей качества поверхностного слоя деталей ГТД и их влияние на эксплуатационные свойства : учеб. пособие / В. Ф. Безьязычный. — Рыбинск : Сатурн, 2004. — 314 с.
4. *Жернаков, В. С.* Проектирование составного холодновысодочного инструмента / В. С. Жернаков, А. А. Кузьминых, Р. Якупов. — М. : Машиностроение, 1999. — 221 с.
5. *Скрынченко, Ю. М.* Работоспособность и свойства инструментальных сталей / Ю. М. Скрынченко, Л. А. Позняк. — Киев : Наук. думка, 1979. — 167 с.
6. *Материаловедение : учеб. для высш. техн. учеб. заведений / Б. Н. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов [и др.].* — М. : Машиностроение, 1986. — 384 с.
7. *Формирование структуры и свойств в инструментальной быстрорежущей стали методом холодной интенсивной деформации и последующей термической обработкой / Э. Ф. Хайретдинов, Г. И. Рааб, А. А. Набиуллин [и др.]; Уфим. гос. авиацион.-техн. ун-т // Материалы физики и механики.* — 2016. — № 27. — С. 205—214.
8. Патент ВУ 21049. Способ аэродинамического упрочнения изделий : опубл. 30.06.2017 / Жигалов А. Н., Шатуров Г. Ф., Головков В. М.
9. *Жигалов, А. Н.* Теоретические основы аэродинамического звукового упрочнения твердосплавного инструмента для процессов прерывистого резания : монография / А. Н. Жигалов, В. К. Шелег. — Могилев : МГУП, 2019. — 213 с.
10. *Горавский, И. А.* Методика проведения аэродинамического звукового упрочнения осевого фрезерного инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 / И. А. Горавский, А. Н. Жигалов, Т. В. Дейхина // Векторы инновационного развития : материалы I Междунар. науч.-практ. конф., 11 дек. 2020 г. / Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020. — С. 64—65.

Поступила в редакцию 03.04.2024.