



УДК 621.74

Поступила 14.03.2017

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЗАКАЛКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 4Х5МФ1С В РАЗЛИЧНЫХ ЗАГОТОВКАХ

ЧАСТЬ 1. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА 1040 °С ПРИ ЗАКАЛКЕ В МАСЛЕ И ОТПУСКА НА ТВЕРДОСТЬ И СТРУКТУРУ ПОКОВОК И ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ 4Х5МФ1С

OPTIMIZATION OF TEMPERATURE HARDENING FOR IMPROVING THE HEAT RESISTANCE OF TOOL STEEL 4X5MΦ1C IN VARIOUS WORKPIECES PART 1. INFLUENCE OF HEATING TEMPERATURE 1040 °C IN THE OIL HARDENING AND HARDENING ON THE HARDNESS AND STRUCTURE OF FORGINGS AND CASTINGS MADE OF STEEL 4X5MΦ1C

*В. Н. ФЕДУЛОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
пр. Независимости, 65. Тел. +375 29 6 31 09 85*

*V. N. FEDULOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
Tel. +375 29 6 31 09 85*

Исследовано влияние температуры закалки с нагревом 1040 °С около 1 ч в масле поковок и отливок из инструментальной стали 4Х5МФ1С на микроструктуру и способность к упрочнению после высокого отпуска при температуре 500–650 °С в течение 1, 5 ч. Показано, что повышения уровня упрочнения по сравнению с требуемым показателем не достигнуто.

Influence of the oil quenching temperature with the heating 1040 °C near 1 hour of tool steel 4X5MΦ1C forgings and castings on the microstructure and the ability to hardening after high temperature tempering at 500–650 °C for 1, 5 hours. It was shown that increase of hardening level in comparison with the required index has not been achieved.

Ключевые слова. Инструментальная сталь, отливка, поковка, закалка, высокий отпуск, твердость, структура.

Keywords. Tool steel, casting, forging, hardening, high-temperature tempering, hardness, structure.

Режимы термической обработки литых сталей для рабочих частей различного вида технологической оснастки обычно назначают, как для деформированного состояния подобной стали. Однако собственные и другие исследования [1, 2] показывают, что для получения высоких свойств литого и даже деформированного металла необходимо для конкретных случаев упрочнения инструмента корректировать по сравнению с ранее известными вариантами как предварительную термическую обработку (отжиг), так и в особенности окончательную, включающую закалку и отпуск.

В частности, в нашем исследовании следует добиваться снижения химической и структурной неоднородности и повышения теплостойкости литой и ковальной стали 4Х5МФ1С за счет проведения высокотемпературного нагрева под закалку, что является потребностью при изготовлении, например, деталей пресс-форм литья изделий из алюминиевых сплавов. Особенно это необходимо, когда используются литые заготовки иликовки большого размера. Оптимизацию режимов термической обработки можно считать основой достижения необходимой эффективности применения инструментальных сталей для оснастки повышенного ресурса работы.

Методическая часть работы состояла в исследовании термического упрочнения стали 4Х5МФ1С с использованием высокого отпуска при температуре 500–650 °С в течение 1,5 ч после закалки в масле от температуры нагрева 1040 °С на первом этапе и последовательном повышении ее до 1150 °С на по-

следнем этапе. Нагрев при закалке проводили по схеме: загрузка в печь при температуре 850 °С, выдержка в течение 0,5 ч, затем увеличение температуры до требуемого значения и выдержка при этой температуре 0,5 ч для заготовок диаметром 33 мм и 1 ч для заготовок диаметром 63–83 мм. Эффективность влияния параметра нагрева при закалке определяли по изменению твердости приведенной стали у поверхности литых и кованных заготовок диаметром от 33 до 83 мм после отпуска во взаимосвязи с изучением морфологии структуры для наиболее важных моментов исследования. Твердость образцов определяли по стандартной методике с зачисткой на глубину около 2 мм. Травление шлифов осуществляли 4%-ным раствором HNO₃ в спирте. Съемку проводили при увеличениях от 100 до 1500.

Задача исследования, таким образом, состояла в установлении уровня твердости у поверхности полуфабрикатов из деформированной и литой стали 4X5MФ1С (табл. 1) приблизительно одного и того же химического состава (табл. 2) после проведения их термического упрочнения с последовательным увеличением температуры нагрева под закалку от 1040 до 1090 и 1150 °С. Наиболее актуальным аспектом исследования являлось повышение твердости стали после закалки и отпуска при 650°С до уровня не ниже 45 HRC.

Т а б л и ц а 1. Полуфабрикаты сталей и способы их получения

Номер образца	Марка стали	Вид	Способ получения полуфабриката
1	4X5MФ1С	Поковка	Ковка до круга диаметром 33x150 мм, охлаждение послековки на воздухе
2	4X5MФ1С	Отливка	Литье в керамическую изложницу, диаметр 33x150 мм, быстрое охлаждение
3	4X5MФ1С	Отливка	То же, но керамическая изложница утеплена в песке и охлаждение медленное
4	4X5MФ1С	Поковка	Ковка, диаметр 63 мм, высота 150 мм, охлаждение послековки на воздухе
5	4X5MФ1С	Отливка	Литье в утепленную керамическую изложницу, диаметр отливки 63 мм, высота 150 мм, охлаждение медленное
6	4X5MФ1С	Отливка	То же, но диаметр 83 мм, высота 150 мм

Т а б л и ц а 2. Химический состав полуфабрикатов из сталей

Наименование полуфабриката и марка стали	Содержание элементов, мас.%						
	С	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni
Поковки стали 4X5MФ1С, № 1 и 4	0,42	1,2	0,36	4,99	1,21	0,89	0,3
Отливки стали 4X5MФ1С, № 2, 3, 5, 6	0,42	1,35	0,35	4,97	1,24	0,90	0,3

Т а б л и ц а 3. Механические свойства полуфабрикатов диаметром 33 мм (образец № 1–3), 63 мм (образец № 4–5) и 83 мм (образец № 6) (см. табл. 1) после закалки с 1040 °С в масле и отпуска

Номер образца	Твердость (HRC) у поверхности после отпуска в течение 1,5 ч при температуре, °С						
	500	525	550	585	600	625	650
1	55		56–57		49–49,5	43–43,5	39
2	55		55–55,5		49–49,5	44–45	40–40,5
3	54,5–55		55–55,5		48–49	43–43,5	40
4	52		54–55	52–53	48–49		39
5	51–52		54–55	51–52	47,5–48		39–40
6	51–52	55–56	54–55	50–51	47–48		39–40

В настоящей статье подробно рассмотрен режим закалки в масле с нагревом при 1040 °С, который принят в качестве основного при проведении термического упрочнения для стали 4X5MФ1С [3]. Данные по значениям твердости деформированной и литой стали для этого случая термического упрочнения заготовок приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что режим термического упрочнения полуфабрикатов из упомянутой стали не дает возможности превзойти результаты, полученные по технологической схеме упрочнения «литье с быстрым охлаждением заготовки диаметром 33 мм в форме на воздухе + высокий отпуск» [4].

Рассмотрим сначала на примере поковки диаметром 63 мм, а затем и отливок диаметром 63 и 83 мм, как выглядит микроструктура деформированной и литой стали 4X5MФ1С после проведения закалки

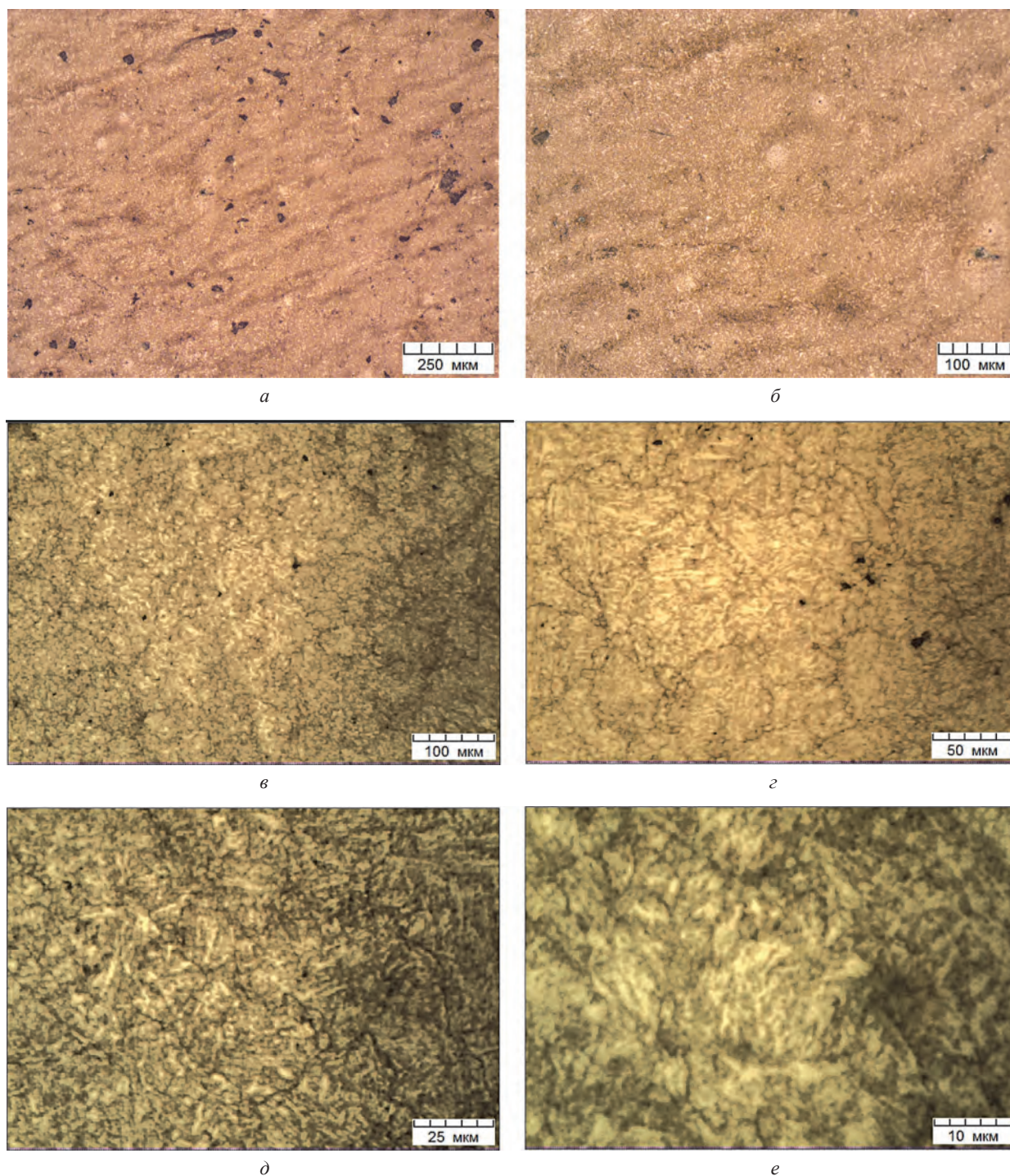
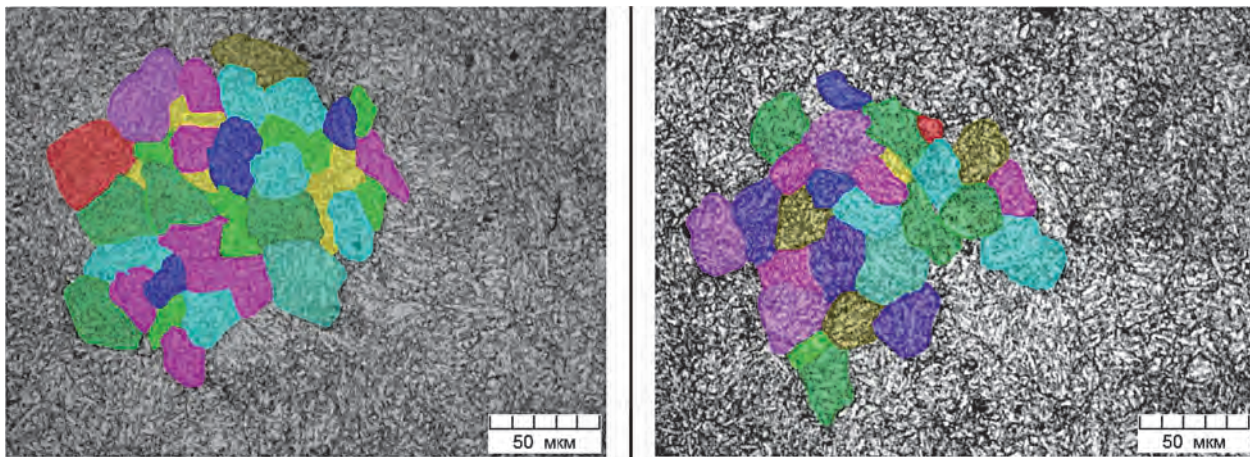


Рис. 1. Микроструктура стали 4X5MФ1С поковки диаметром 63 мм после закалки в масле с нагревом при 1040 °С в течение 1 ч и отпуска при 650 °С в течение 1,5 ч при последовательном увеличении изображения

в масле от температуры нагрева 1040 °С и последующего отпуска заготовок при 650 °С. Это должно помочь установить причины снижения твердости, в данном случае упрочнения по сравнению с более низкой температурой нагрева при отпуске, например, 550 °С.

Микроструктура стали поковки (рис. 1–3), как бы имеет следы от неравномерного протекания пластической деформации, которые сохранились после высокотемпературного нагрева, закалки в масле и отпуска. Они особенно хорошо выявляются при малом увеличении в виде светлых и темных зон травления (рис. 1, *a, б*) или в виде разного окраса фаз при последовательном повышении увеличения изображения (рис. 1, *в, з, д, е*). Светлые и темные зоны приобретают сначала вид незначительной неоднородности микроструктуры, а при еще большем увеличении изображения отчетливо видно, что это по-разному окрашенные после травления продукты распада аустенита различной дисперсности.



Маски выделения зерен

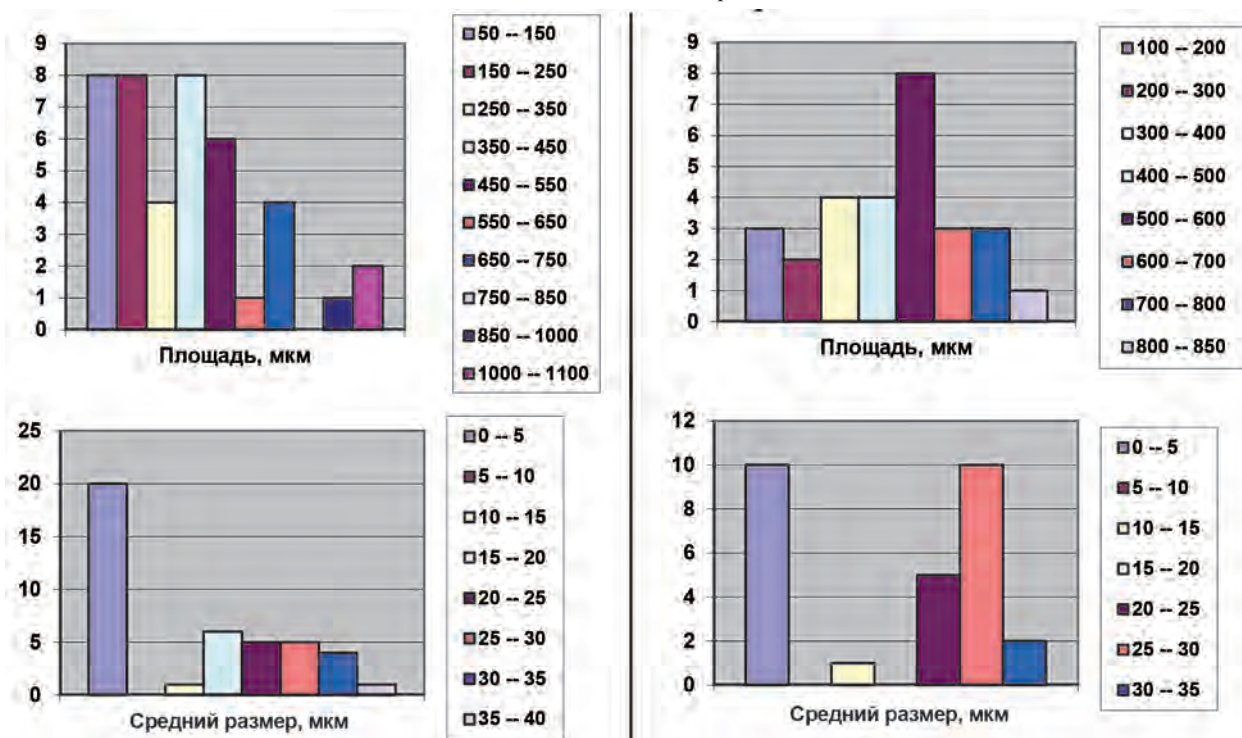


Рис. 2. Маски выделения зерен стали 4X5MФ1С и гистограммы распределения этих зерен по площади и среднему размеру после упрочнения поковки закалкой в масле от 1040 °С (1 ч) с отпуском при 650 °С в течение 1,5 ч

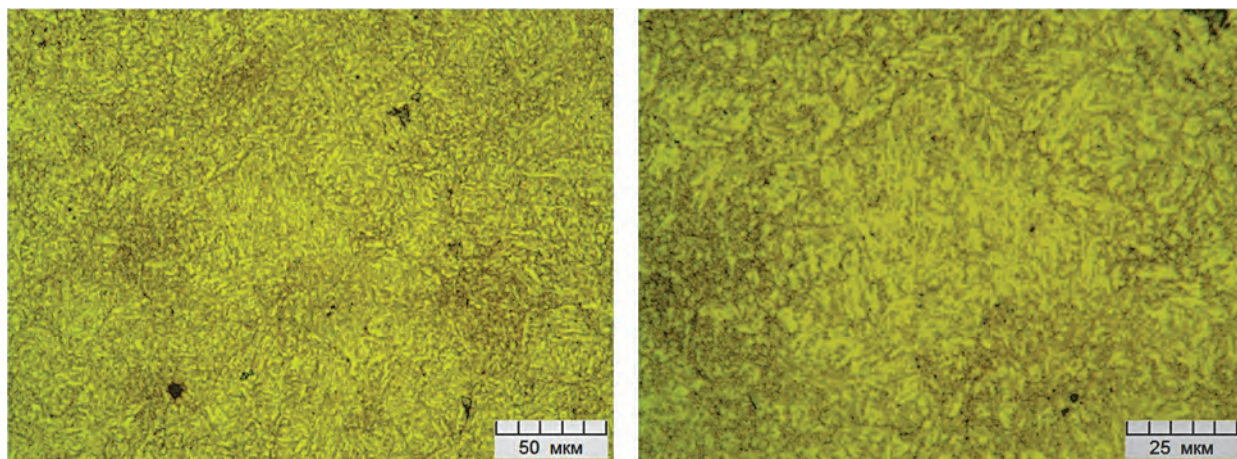


Рис. 3. Микроструктура стали 4X5MФ1С поковки, характеризующая переход ее от мартенситной к перлитной форме построения

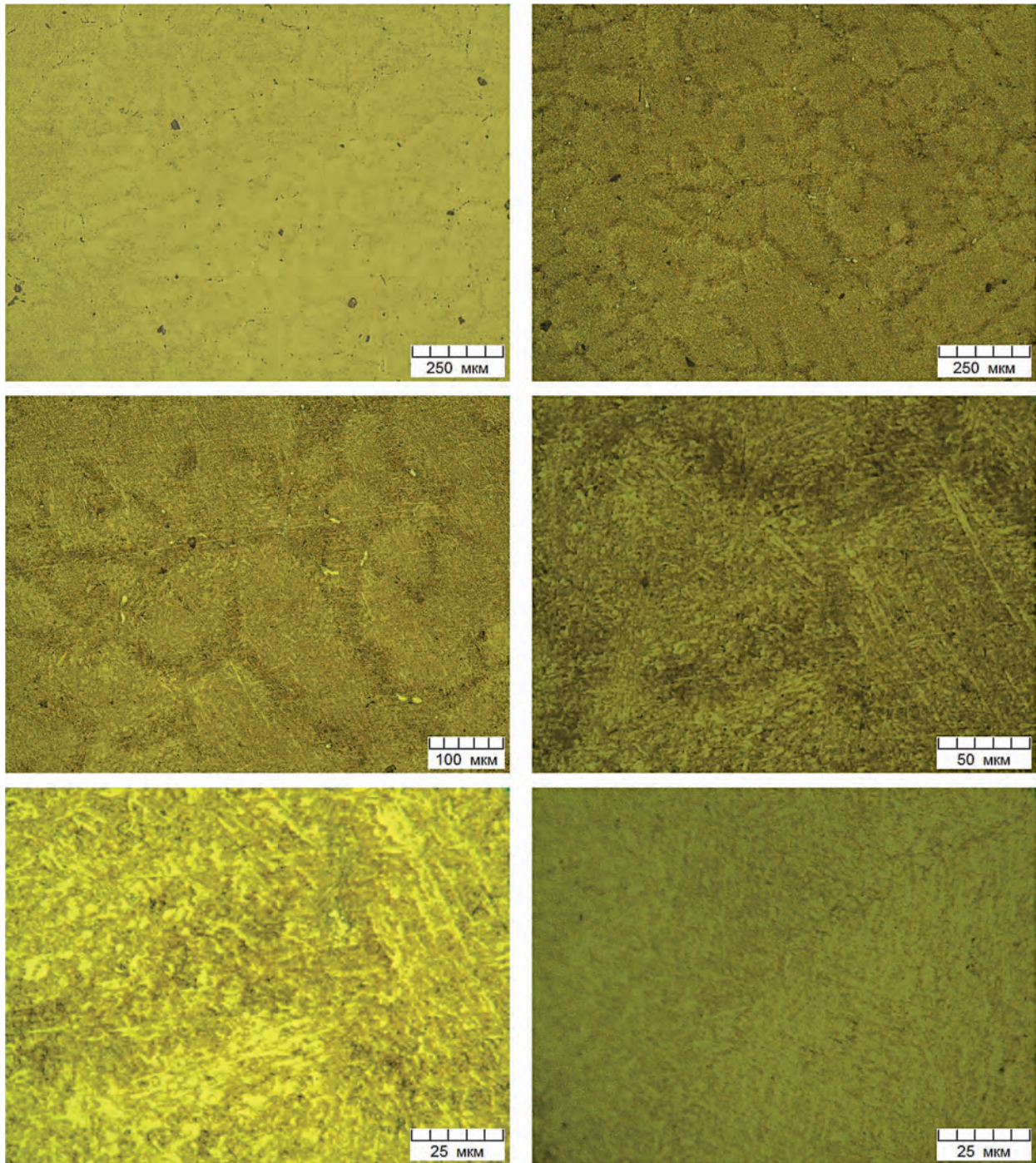


Рис. 4. Типичная микроструктура литой стали 4X5МФ1С после проведения закалки в масле от 1040 °С (1 ч) и отпуска при 650 °С в течение 1, 5 ч в отливке диаметром 63 мм (дендриты выявляются хорошо, а зерна в дендритах – менее отчетливо)

Следовательно, после травления и при большом увеличении микроструктура стали поковки диаметром 63 мм представляет собой выраженную зеренную структуру: видно наличие образовавшегося при нагреве 1040 °С аустенитного зерна, внутри границ которого расположены продукты распада аустенита от мартенсита до перлита (рис. 1–3). Можно считать, что в стали произошла некоторая гомогенизация микроструктуры поковки после нагрева до 1040 °С и выдержки в течение 1 ч и формирование мартенсита отпуска в процессе полной термической обработки при отпуске вплоть до 550–600 °С, судя по твердости. Микроструктура же деформированной стали после отпуска при 650 °С выглядит как переходная от мартенситного к перлитному построению. Она особенно отчетливо представлена на рис. 3. Границы зерен имеются, но выявляются все же слабо. Расчет параметров зерен свидетельствует о разном зернистости структуры (рис. 2). Размер зерен колеблется от 5 до 35 мкм, а площадь зерен изменяется от 50 до 650 мкм². Падение твердости при повышении температуры отпуска выше 600 °С вызвано имен-

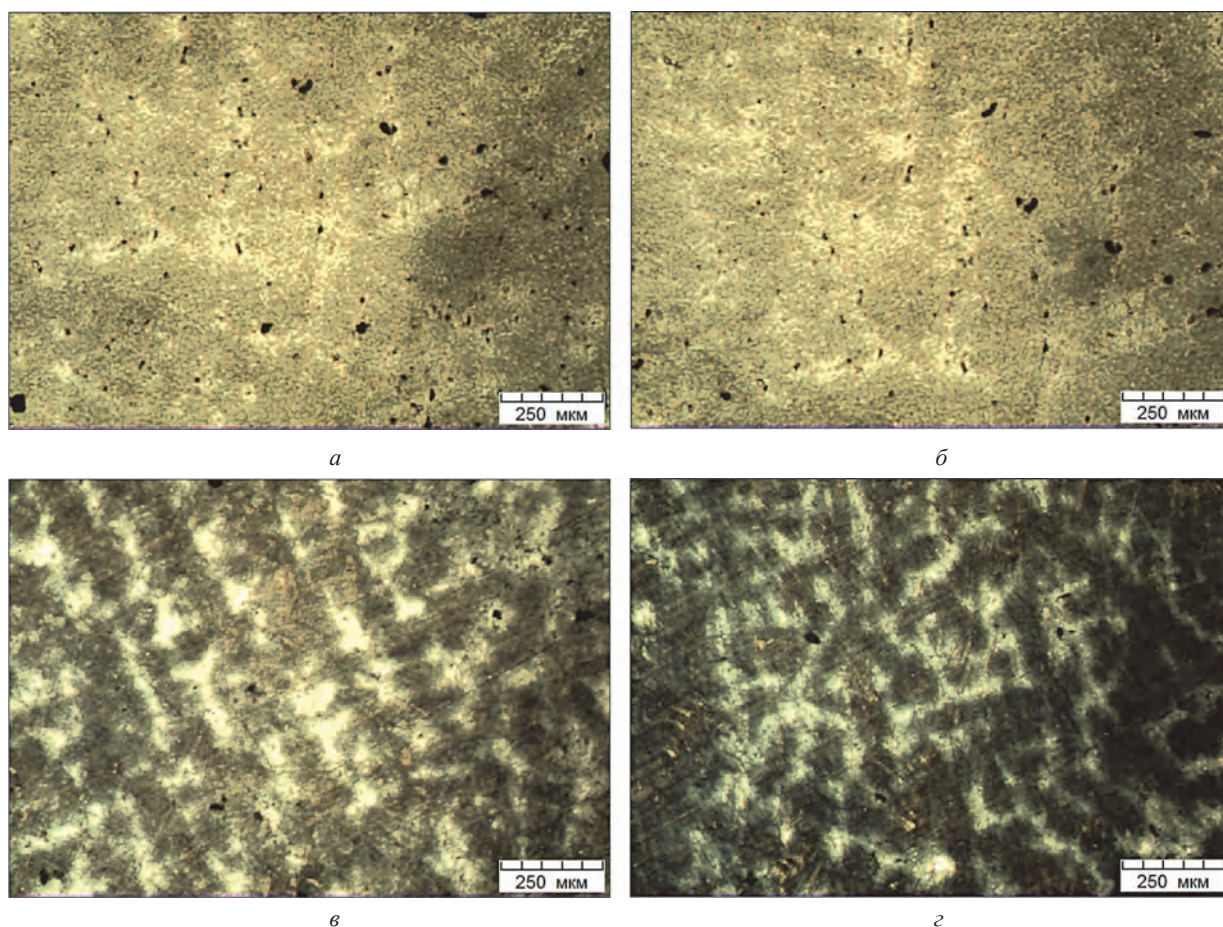


Рис. 5. Микроструктура литой стали 4X5MФ1С в наружных слоях отливки диаметром 83 мм после закалки в масле от 1040 °С (1 ч) и отпуска при 650 °С (1,5 ч): а, б – обычное травление; в, г – перетравлено для наглядности

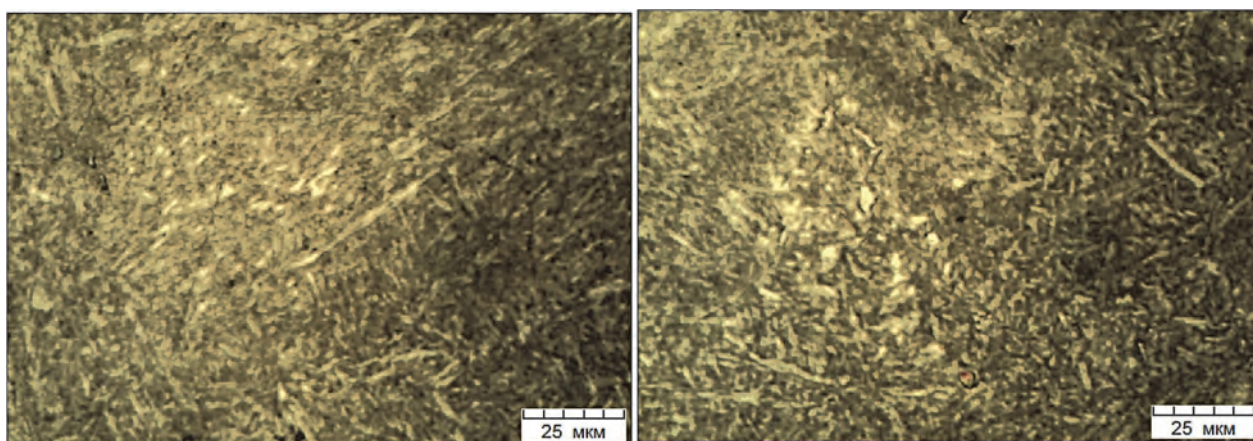


Рис. 6. Внутридендритная микроструктура литой стали 4X5MФ1С в наружных слоях отливки диаметром 83 мм после закалки в масле от 1040 °С (1 ч) и отпуска при 650 °С (1,5 ч): продукты распада аустенита разного окраса после проведения травления шлифа

но этим частичным переходом от мартенситной структуры к перлитной форме построения фаз первичного распада аустенита в результате отпуска при температуре 650 °С в течение 1,5 ч (табл. 3, рис. 3).

Микроструктура стали 4X5MФ1С поковки (рис. 1–3), тем не менее, является достаточно однородной по сравнению с микроструктурой отливок (рис. 4–6), хотя оба вида структуры, на наш взгляд, вполне приемлемы при производстве рабочих частей пресс-форм литья алюминиевых сплавов.

Литая структура характеризуется наличием междендритной прослойки, отличающейся по своему химическому составу от химического состава стали внутри дендрита (рис. 4–6). Нагрев литой стали при температуре 1040 °С в течение 1 ч эту неоднородность не устраняет, а лишь незначительно меняет. Нужен нагрев под закалку при более высокой температуре. Следует, по всей видимости, попробовать повы-

шение температуры нагрева под закалку до 1090 и 1150 °С с одновременным сохранением времени выдержки до 1 ч.

Тем не менее, рассмотрим подробнее и микроструктуру литой стали после закалки от 1040 °С в масле и отпуска при температуре 650 °С. Подтверждением процесса начала перекристаллизации литой структуры может служить изменение морфологии и соотношения структурных составляющих. На первый взгляд, из рис. 4 видно, что в значительной степени сохранилась структура, отвечающая литому состоянию [4]. Нет также полной уверенности в том, что произошел рост аустенитного зерна по сравнению с литым состоянием в дендритах. На рис. 5 отчетливо наблюдаются ориентированные в пространстве дендриты (темные участки) и междендритные участки (светлые). Для выяснения изменения характера структуры в данном случае и осуществляли травление образцов в различной степени. Изменилась только доля площади, занимаемая светлой компонентой в структуре стали: в среднем она стала составлять около 26,5% (рис. 5). Увеличение доли ферритообразной составляющей обусловлено, скорее всего, дополнительным легированием аустенита внутри дендритов при температуре нагрева 1040 °С в течение 1 ч за счет диффузии и изменения химического состава междендритной прослойки. Зерно как таковое, т. е. участки с границами в дендритах, в структуре выявляются очень слабо. Микроструктура внутри дендритов, скорее всего, представляет собой более мелкие по сравнению с поковкой образования отпущенного мартенсита и перлитные образования (рис. 6), характерные и, скорее всего отличные друг от друга, для случаев отпуска, например, при температуре 625 и 650 °С. Подтверждением последнему выводу может служить снижение уровня твердости стали до 43 HRC и 39–40 HRC соответственно для каждого из упомянутых режимов отпуска (табл. 3).

Стало очевидным, что снижение отпускостойчивости и теплостойкости закаленной с температуры 1040 °С в масле ковальной и литой стали 4X5MФ1С наступает при проведении отпуска выше 600 °С в течение 1,5 ч, когда крупные образования мартенсита отпуска в более обедненных легирующими элементами зонах начинают заменять на перлит подобные структурные фазы. При повышении температуры отпуска до 650 °С процесс активизируется, что приводит к снижению твердости от значений 47–49 HRC при температуре отпуска 600 °С до 39–40 HRC при 650 °С.

Выводы

1. Химическая неоднородность микроструктуры литой стали 4X5MФ1С закалкой в масле с нагревом при 1040 °С в течение около 1 ч устраняется частично, а повышенный по сравнению с уже известным уровень упрочнения поковок и отливок после отпуска при температуре 500–650 °С практически не достигается, особенно из-за смены мартенситного типа структуры на перлитные формы образований при отпуске с нагревом 625–650 °С.

2. Добиваться повышения твердости стали в литом и деформированном состоянии до уровня 45 HRC после отпуска при 650 °С следует за счет использования более высокой температуры нагрева этой стали под закалку: 1090 °С и более, что выше общепринятого и рекомендованного ранее в литературных источниках значения.

Литература

1. Федулов В. Н. Пути повышения стойкости высоконагруженного инструмента горячей высадки головок болтов / В. Н. Федулов // *Литье и металлургия*. 2016. № 1. С. 120–129.
2. Гурьев А. М. Литые штампы для горячего объемного деформирования и особенности их термической и химико-термической обработки / А. М. Гурьев, Ю. П. Хараев, А. А. Колядин, О. В. Шаметкина // *Литейное производство*. 2004. № 1. С. 8–11.
3. Позняк Л. А. Штамповые стали / Л. А. Позняк, Ю. М. Скрынченко, С. И. Тишаев. М.: Металлургия, 1980. С. 150.
4. Федулов В. Н. Влияние условий охлаждения и размера заготовки при литье инструментальной стали на способность к последующему термическому упрочнению поверхности / В. Н. Федулов // *Литье и металлургия*. 2016. № 3. С. 117–127.

References

1. Fedulov V. N. Puti povysheniya stojkosti vysokonagruzhennogo instrumenta gorjachej vysadki golovok boltov [Methods of increasing the resistance of a heavily hot tool landing bolt heads]. *Lite i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 1, pp. 120–129.
2. Gur'ev A. M. V Haraev Ju. P., Koljadin A. A., Shametkina O. V. Litye shtampy dlja gorjachego obemnogo deformirovaniya i osobennosti ih termicheskoj i himiko-termicheskoj obrabotki [Cast dies for hot volumetric deformation and features of their thermal and chemical-thermal processing]. *Litejnoe proizvodstvo = Foundry*, 2004, no. 1, pp. 8–11.
3. Poznjak L. A., Skrynchenko Ju. M., Tishaev S. I. *Shtampovye stali* [Stamping steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1980, 150 p.
4. Fedulov V. N. Vlijanie uslovij ohlazhdenija i razmera zagotovki pri lite instrumental'noj stali na sposobnost' k posledujushhemu termicheskomu uprochneniju poverhnosti [Influence of cooling conditions and the size of stock material during casting of tool steel on capability to the subsequent thermal hard-facing]. *Lite i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 117–127.