



УДК 621.74

Поступила 10.04.2017

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ЗАКАЛКИ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ
4Х5МФ1С В РАЗЛИЧНЫХ ЗАГОТОВКАХ.
ЧАСТЬ 2. ВЫБОР РЕЖИМА ЗАКАЛКИ СТАЛИ 4Х5МФ1С
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТВЕРДОСТИ И ТЕПЛОСТОЙКОСТИ ПОСЛЕ ОТПУСКА
OPTIMIZATION OF TEMPERATURE HARDENING FOR IMPROVING
THE HEAT RESISTANCE OF TOOL STEEL 4X5MΦ1C IN VARIOUS
WORKPIECES.
PART 2. THE CHOICE OF THE MODE OF HARDENING STEEL 4X5MΦ1C
TO INCREASE THE HARDNESS AND HEAT RESISTANCE AFTER TEMPERING**

*В. Н. ФЕДУЛОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,
пр. Независимости, 65. Тел. +37529 631 09 85*

*V. N. FEDULOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
Tel. +375 29 631 09 85*

Разработан новый режим термической обработки, включающий закалку в масле от температуры 1150 °С с использованием отпуска при температуре 500–650 °С в течение 1,5 ч. Эффект повышения уровня упрочнения и теплоустойчивости определяется более полным растворением матрицы стали, укрупнением зерен и морфологии первичных фаз структуры в результате высокотемпературного нагрева и увеличения количества вторичных фаз в результате отпуска. Результаты работы могут использоваться при производстве рабочих частей высокоресурсного инструмента для горячего формообразования.

A new mode of heat treatment, including oil quenching from temperature 1150 °C with tempering at 500–650 °C for 1,5 hours was developed. The effect of increasing the level of hardening and the heat resistance is determined by more complete dissolution of the steel matrix, the coarsening of grains and morphology of the primary phase of the structure and as a result of high temperature heating and increasing of the number of secondary phases as a result of the tempering. The results of the work could be used in production of working parts is highly resourceful tool for heat forming.

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

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

Для получения нужной формы матрицы или пуансона пресс-форм литья алюминиевых сплавов большинство используемых заготовок подвергается значительному объему механической обработки. Стоимость пресс-форм в общей сложности колеблется от 3 до 10 тыс. долл. Чтобы покрыть затраты на изготовление, необходимо повысить ресурс работы таких пресс-форм до 60 000–100 000 штук годных деталей и более. Следует найти способ термической обработки литых и кованных заготовок и химический состав сложнлегированной инструментальной стали с высоким содержанием в ее составе хрома типа 4Х5МФ1С, обеспечивающие повышение твердости и теплоустойчивости до уровня упрочнения по схеме «литье с быстрым охлаждением заготовок диаметром 33 мм + высокий отпуск», как в работе [1], а также пластичности. Режим термического упрочнения с использованием закалки в масле от 1140 °С и отпуска для стали 4Х5МФ1С, как было показано в ч. 1 настоящей статьи, таких требований не обеспечил. Для решения части проблемы пока продолжим исследования по влиянию температуры нагрева 1090 и 1150 °С при закалке полуфабрикатов из указанной стали с различным типом структуры на уровень их упрочнения у поверхности после проведения высокого отпуска при температуре 500–650 °С.

Таблица 1. Механические свойства поковки (1) и отливок с быстрым и медленным охлаждением (2, 3) диаметром 33 мм, а также поковки и отливки диаметром 63 мм (4, 5) и отливки диаметром 83 мм (6) после закалки от 1090 °С в масле и отпуска

№ п/п	Твердость HRC стали у поверхности после отпуска в течение 1,5 ч при температуре, °С				
	500	550	600	625	650
1	55	58	54–55	49–50	40–41
2	54–55	57–58	54–55	49–50	43
3	55–55,5	56–57	54–55	47–48	40–41
4	54–55	56–57	52–53	47–48	39–40
5	53	55–56	52–53	47–48	39–40
6	53	55–56	52–53	47–48	39–40

Из табл. 1 видно, что уровень упрочнения поволок и отливок из стали 4Х5МФ1С с использованием закалки в масле от температуры нагрева 1090 °С (выдержка для заготовок диаметром 33 мм – 0,5 ч и диаметром 63–83 мм – 1 ч) и высокого отпуска выше, чем при проведении подобной закалки от 1040 °С. Однако значения твердости все же уступают уровню упрочнения с использованием выгодной технологической схемы для литой заготовки диаметром 33 мм с быстрым охлаждением на воздухе и высоким отпуском [1]. Все также не достигнуто упрочнение до уровня твердости 45 HRC после отпуска при температуре 650 °С.

И только нагрев до температуры 1150 °С и выдержка в течение 0,5 ч для заготовок диаметром 33 мм и 1 ч отливок диаметром 63 и 83 мм при закалке в масле обеспечивают получение требуемого уровня твердости стали 4Х5МФ1С на поверхности всех видов заготовок при отпуске 500–650 °С в течение 1,5 ч

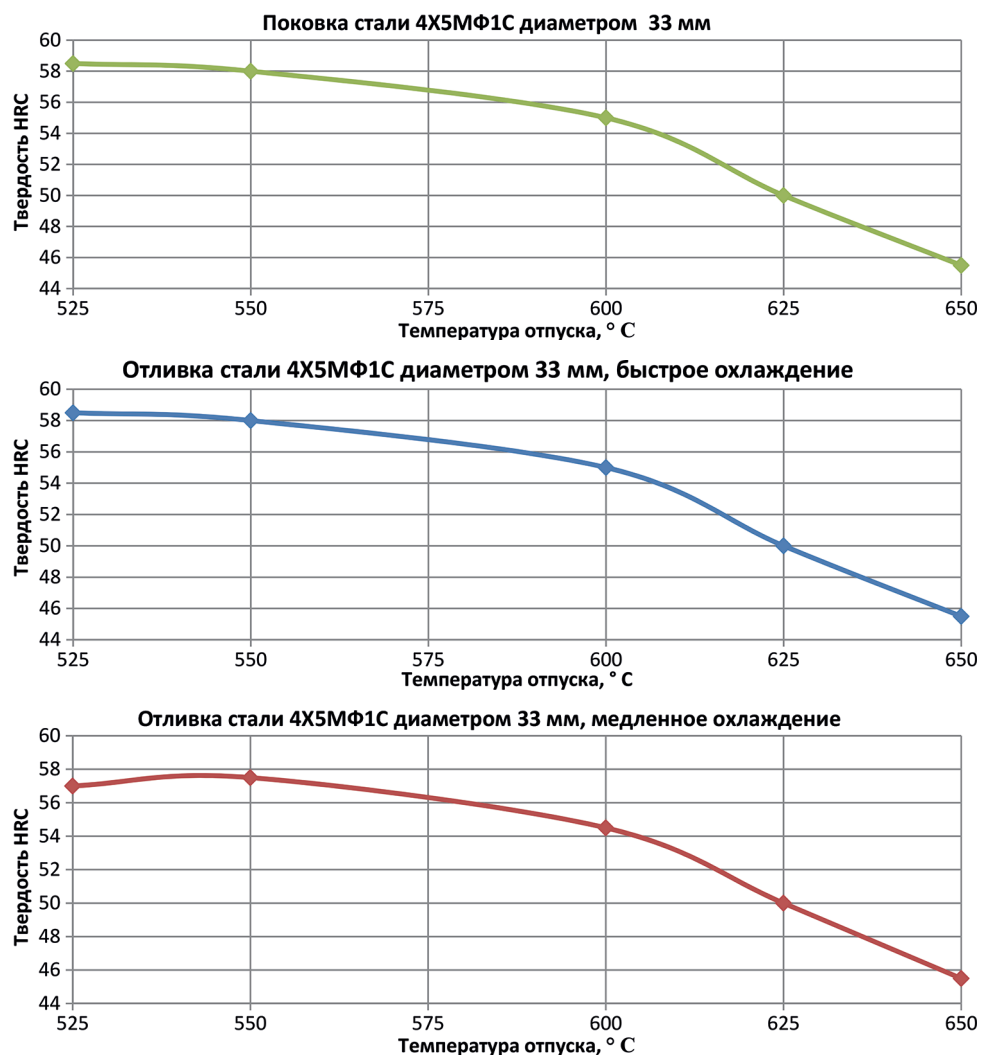


Рис. 1. Зависимость твердости у поверхности изделий из стали 4Х5МФ1С от температуры отпуска после закалки от 1150 °С в масле

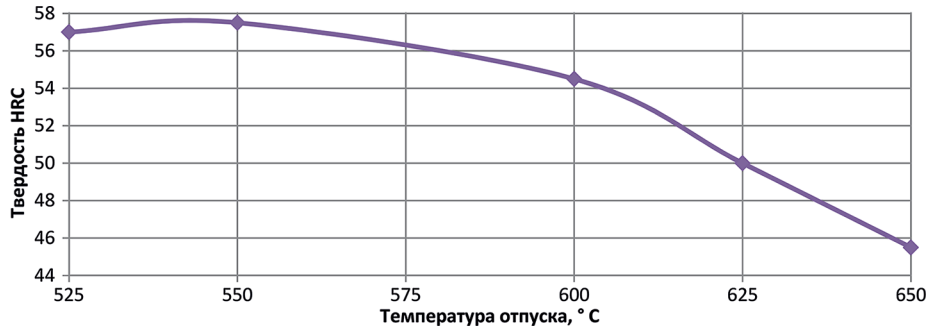


Рис. 2. Примерная зависимость твердости стали 4X5MФ1С у поверхности поковки и отливки диаметром 63 мм и отливки диаметром 83 мм от температуры отпуска после закалки от 1150 °С в масле

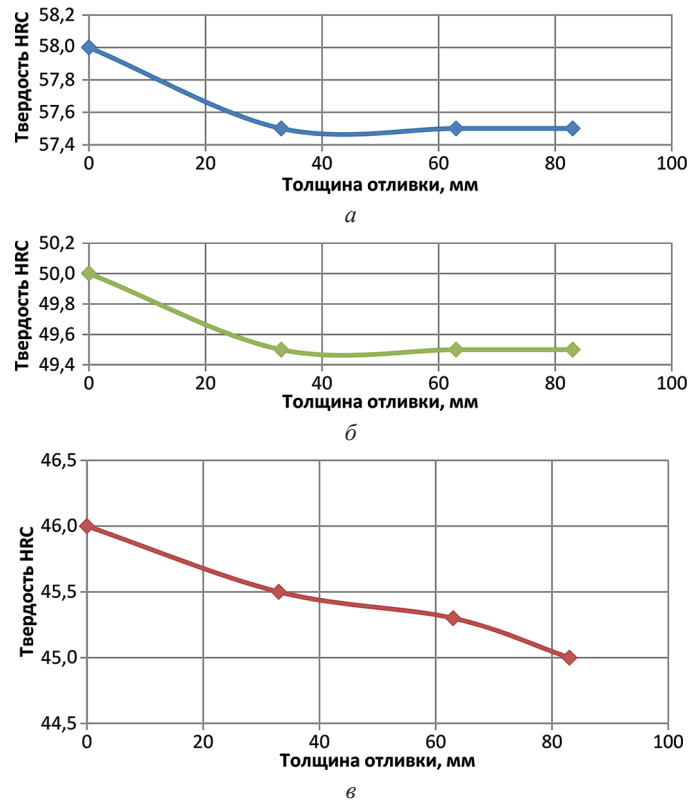


Рис. 3. Зависимость твердости у поверхности от диаметра отливки для случая закалки от температуры 1150 °С в масле и разного режима отпуска: а – для температуры отпуска 550 °С; б – 625; в – 650 °С

Таблица 2. Механические свойства полуфабрикатов диаметром 33 мм (1–3), 63 мм (4, 5) и 83 мм (6) после закалки с 1150 °С в масле и отпуска

№ п/п	Твердость HRC стали у поверхности после отпуска в течение 1,5 ч при температуре, °С				
	525	550	600	625	650
1	58–59	57,5–58	55	50	45–46
2	58	57,5–58	54–55	50	45–46
3	57–58	57,5	54–55	49–49,5	45–46
4	57	57–57,5	54–55	50	45–46
5	57	57–57,5	54–55	50–51	45–46
6	57	57–57,5	54	50	45

(табл. 2, рис. 1–3). Полученные значения те же или даже чуть выше, чем для случая упрочнения быстро охлажденной отливки диаметром 33 мм, описанного в работе [1]. По результатам проведенного термического упрочнения заготовок из стали 4X5MФ1С разных толщин и способов их получения [1] видно, что наиболее эффективным с точки зрения повышения твердости и теплостойкости является именно этот способ. Даже после отпуска при температуре 650 °С в течение 1,5 ч получена требуемая и высокая твердость у их поверхности для исследуемой стали: не менее 45 HRC.

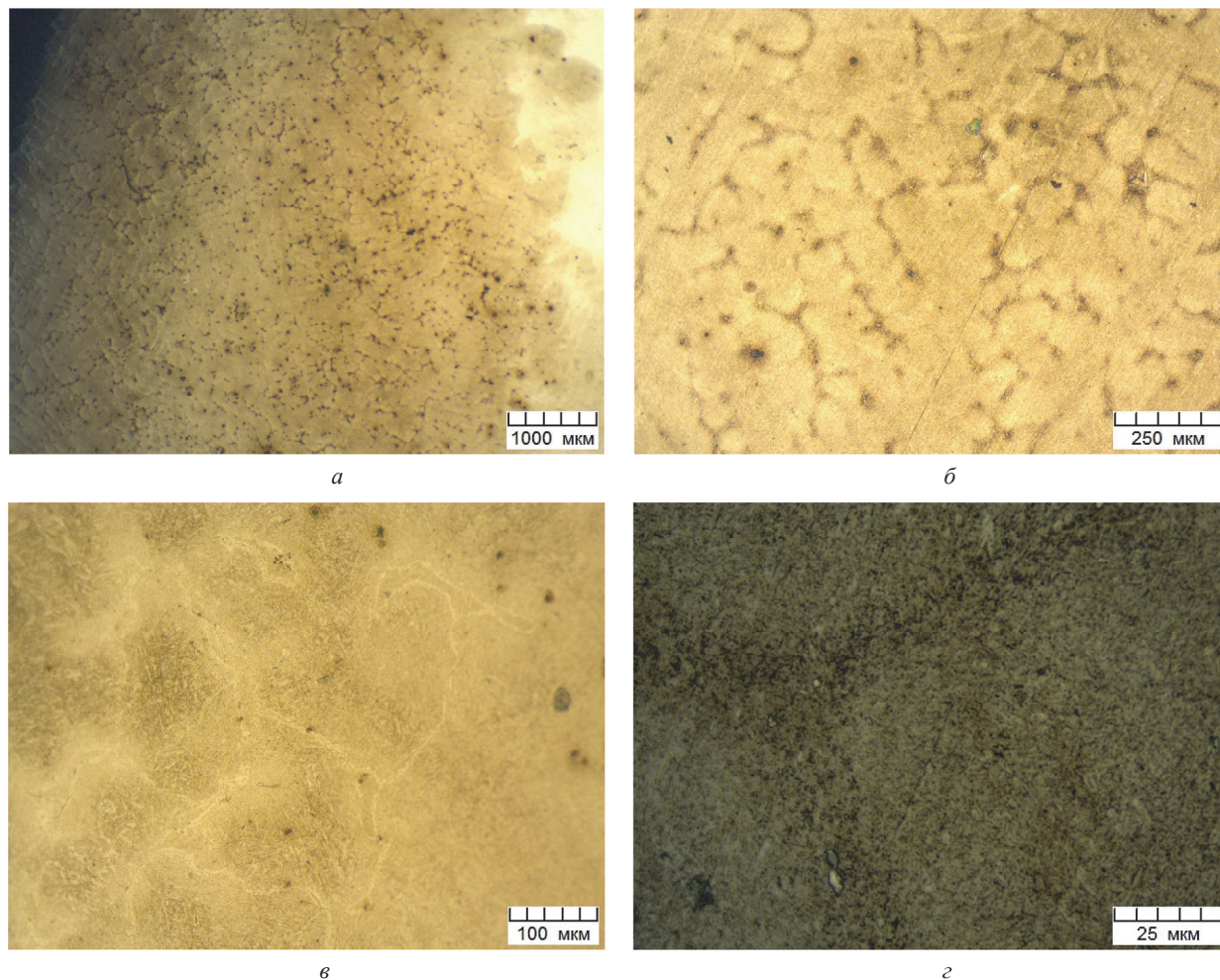


Рис. 4. Микроструктура литой стали 4X5MФ1С у края отливки диаметром 63 мм после закалки от 1150 °С в масле и отпуска при 650 °С в течение 1,5 ч при разных увеличениях

Разработанный способ термического упрочнения, по всей видимости, обеспечивает при нагреве 1150 °С большее растворение исходной матричной структуры стали в поковках и отливках, изменение ее морфологии в результате закалки в масле и позволяет добиться большего эффекта повышения твердости при последующем отпуске. Одновременно предложенный режим нагрева при закалке должен обеспечивать выравнивание микроструктуры стали в наружных слоях литых и деформированных заготовок после отпуска и соответственно на рабочих частях матриц и пуансонов пресс-форм литья изделий из алюминиевых сплавов.

Рассмотрим более подробно микроструктуру литой стали 4X5MФ1С для случая закалки от температуры 1150 °С в масле и отпуска при 650 °С в течение 1,5 ч для отливок диаметром 63 мм. Микроструктура литой стали 4X5MФ1С у края отливки диаметром 63 мм показана на рис. 4. После нагрева при 1150 °С около 1 ч, закалки в масле и отпуска при температуре 650 °С в течение 1,5 ч она может быть определена, на первый взгляд, как дендритного типа (рис. 4, а, б, в). Поперечный размер дендритов составляет порядка 100–150 мкм. Эта оценка была произведена только для тех дендритов, которые имеют равноосную форму и могут рассматриваться на фотографии в поперечном сечении. Внутريدендритная микроструктура упрочненной литой стали 4X5MФ1С в первом приближении достаточно однородна (рис. 4, г, 5, а и б).

Микроструктура литой стали 4X5MФ1С у отливки диаметром 63 мм после закалки в масле от температуры 1150 °С и отпуска при температуре 650 °С, 1,5 ч при малом увеличении (рис. 7, а), таким образом, кажется подобной таковой для случая использования закалки от 1040 °С и отпуска при 650 °С (рис. 7, б). И в то же время при большем увеличении микроструктура стали для оптимизированного случая упрочнения с закалкой от 1150 °С выглядит как более однородная по сечению и с четко выраженными границами вновь образовавшихся аустенитных зерен и в дендритах, и междендритном пространстве (см. рис. 5, а, по сравнению с рис. 5, б). Одновременно в микроструктуре наблюдаем и более крупные выделения мар-

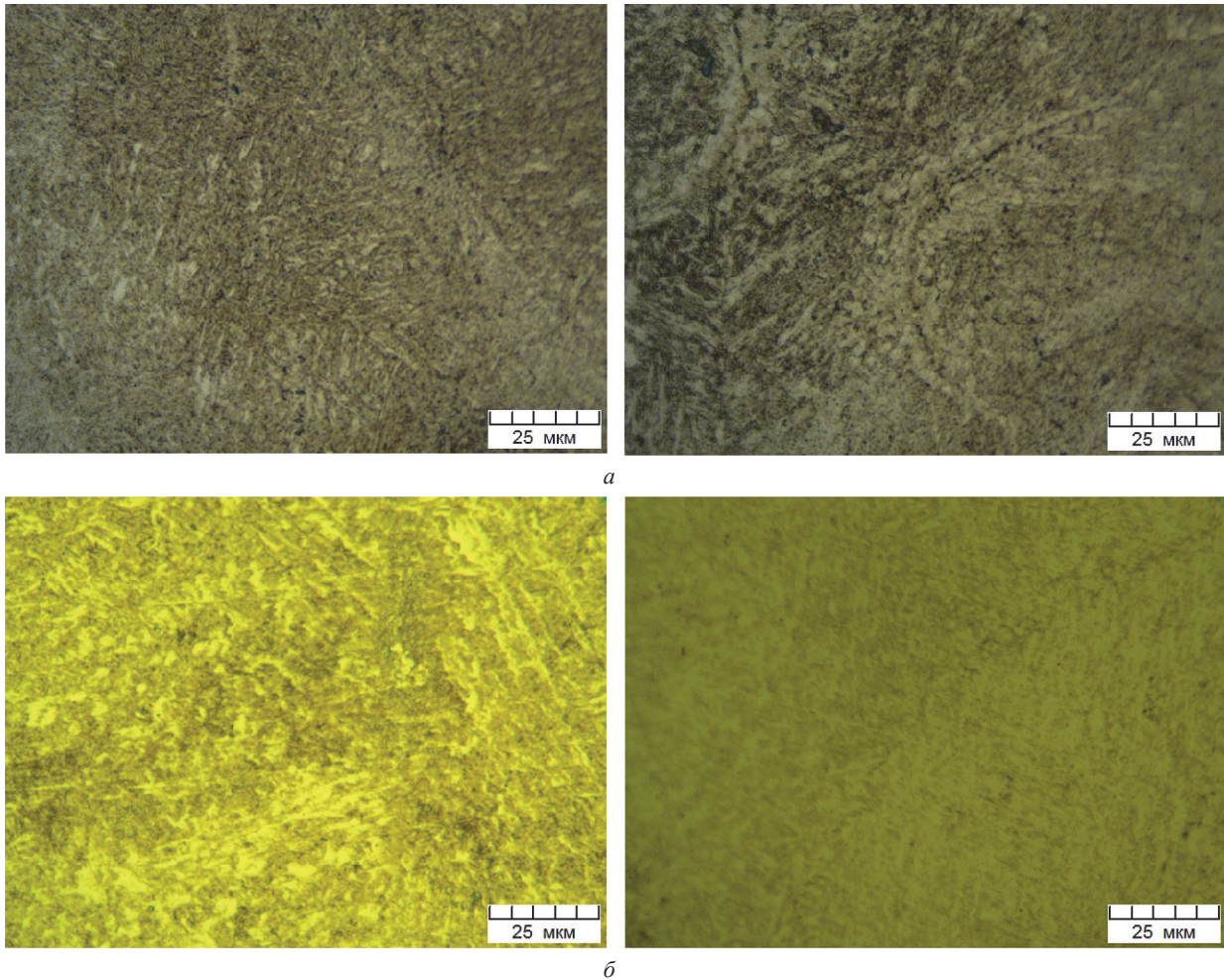


Рис. 5. Микроструктура литой стали 4X5MФ1С у отливки диаметром 63 мм после закалки от температуры 1150 °C (а) и 1040 °C (б) в масле и отпуска при температуре 650 °C, 1,5 ч

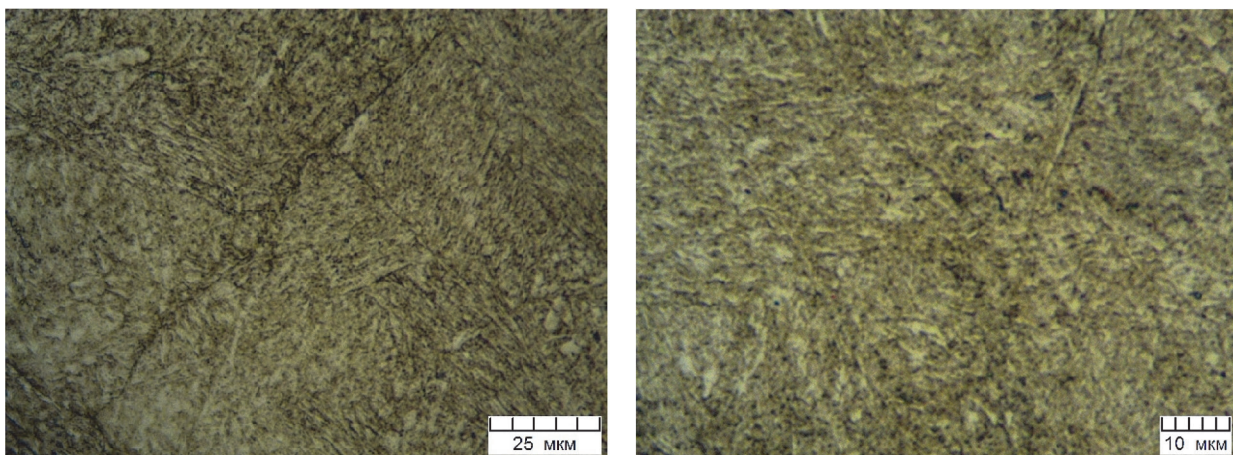


Рис. 6. Мартенсит отпуска в микроструктуре литой стали 4X5MФ1С у края отливки диаметром 63 мм после закалки в масле от температуры 1150 °C и отпуска при температуре 650 °C, 1,5 ч

тенсита отпуска (см. рис. 6) и отсутствие перлитных выделений, чем в случае нагрева при закалке в масле 1040 °C.

Наиболее интересно наблюдение микроструктуры стали 4X5MФ1С у поковки после проведения закалки с нагревом при 1040 и 1150 °C (рис. 8), так как в практике изготовления пресс-форм до настоящего времени применяют только кованные заготовки. Различие микроструктуры стали в поковке после проведения закалки от 1040 °C в масле и отпуска при 650 °C, 1,5 ч (рис. 8, а, в) и соответственно после закалки от 1150 °C и отпуска при 650 °C, 1,5 ч (рис. 8, б, г) хорошо видно: в последнем случае в ней отсут-

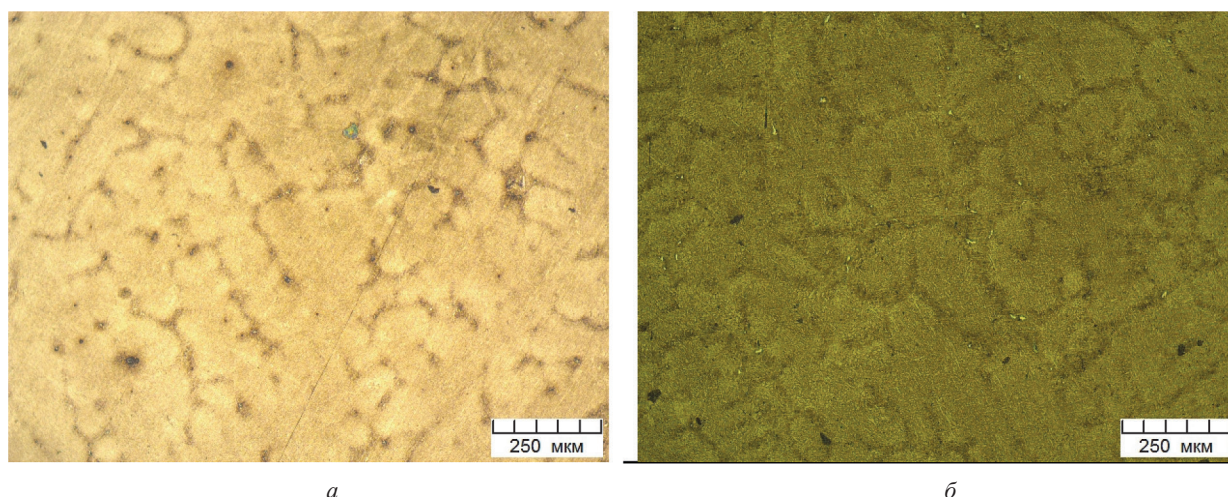


Рис. 7. Сравнение дендритной микроструктуры литой стали 4X5MФ1С отливки диаметром 63 мм после закалки в масле от температуры 1150 °C (а) и 1040 °C (б) и отпуска при температуре 650 °C, 1,5 ч

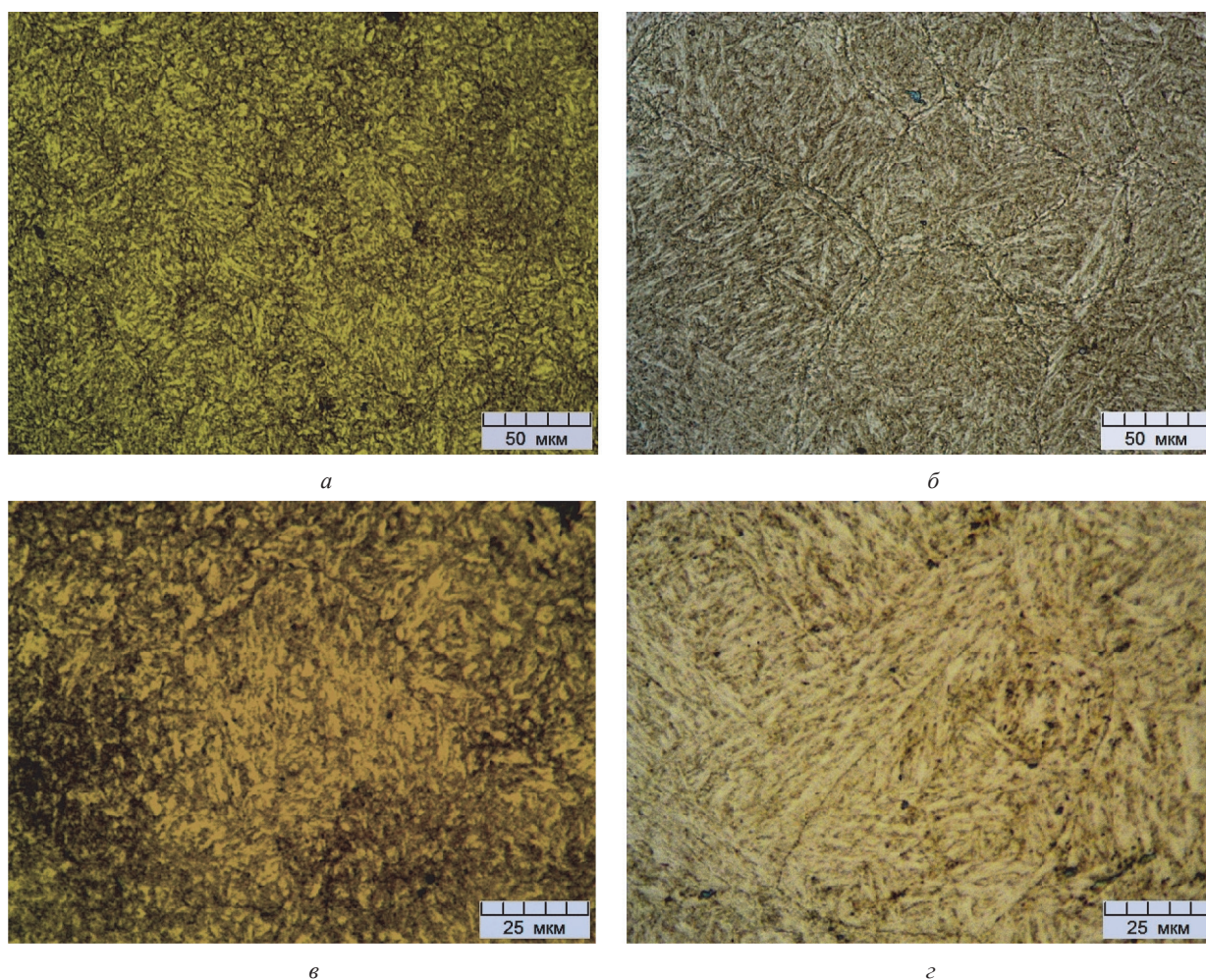
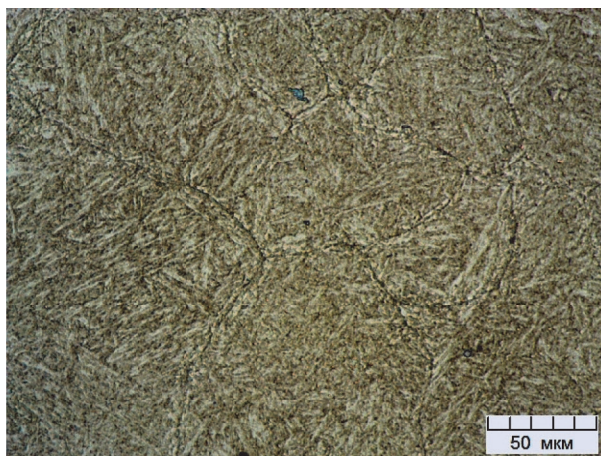


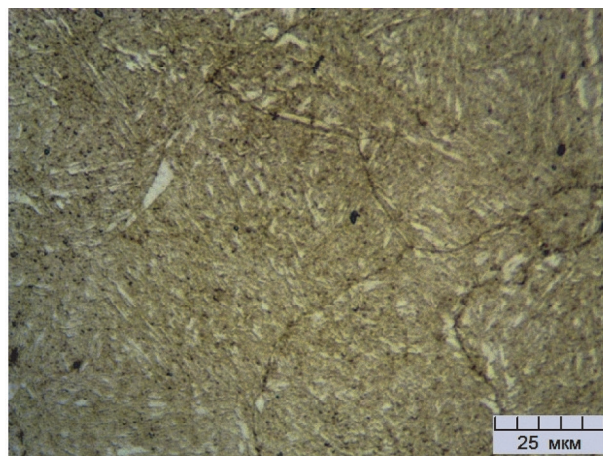
Рис. 8. Сравнение микроструктуры стали 4X5MФ1С у поковки диаметром 63 мм после закалки в масле от 1040 °C (а, б) и 1150 °C (в, г) и отпуска при температуре 650 °C, 1,5 ч

ствуют перлитоподобные фазы (рис. 9). Именно за счет более крупной морфологии мартенсита отпуска и отсутствия перлитоподобных выделений в структуре стали 4X5MФ1С в поковке после закалки в масле от 1150 °C и отпуска 650 °C стало возможным повысить твердость стали на поверхности заготовок до значений 45 HRC вместо 39–40 HRC.

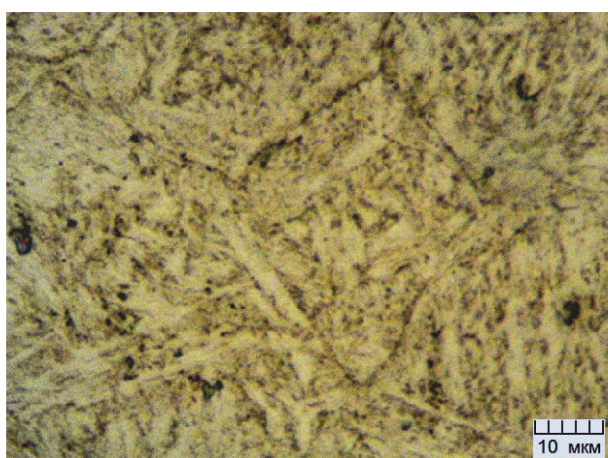
Сталь 4X5MФ1С у поковки после закалки от 1150 °C по сравнению с отливкой из этой же стали имеет более крупную микроструктуру: крупнее и зерно, и морфология выделений мартенсита отпуска, когда



а



б



в

Рис. 9. Внутризеренная микроструктура и мартенсит отпуска стали 4X5MФ1С у края поковки диаметром 63 мм после закалки в масле от 1150 °С и отпуска при 650 °С, 1,5 ч

наблюдается более толстая и короткая их форма на рис. 8, б, г и рис. 9 по сравнению с рис. 6, хотя значения твердости для обоих случаев примерно равны при всех режимах отпуска.

Таким образом, показано, что упрочнение заготовок из стали 4X5MФ1С с применением закалки в масле, например, для деталей пресс-форм литья алюминиевых сплавов лучше проводить с нагревом при температуре 1150 °С в течение 0,5–1 ч в зависимости от толщины их сечения. Закалка с таким нагревом обеспечивает получение выигрыша в твердости и соответственно в теплостойкости. Температуру отпуска после закалки для деталей пресс-форм необходимо назначать в пределах 600–650 °С в течение 1,5–2 ч исходя из условий сложности их конфигурации. Более сложная форма алюминиевой отливки, получаемой с использованием пресс-формы, из-за большего разогрева рабочих частей во время эксплуатации будет требовать более высокой температуры собственно отпуска матрицы и пуансона.

Способ получения заготовок для рабочих частей пресс-форм: поковку или отливку следует выбирать также исходя из сложности конструкции их рабочих частей и необходимости выбора ресурса работы. Для простых деталей матриц или пуансонов лучше использовать поковки, а для деталей более сложных конструкций – отливать заготовки из отходов инструментальных сталей. Для повышения пластичности и ударной вязкости стали 4X5MФ1С или подобной стали 4X5MФС в их состав можно вводить дополнительно никель в количестве 1,5–2,0% и тогда содержание углерода доводить до 0,45–0,52% для повышения твердости при отпуске [2]. При производстве отливок из сложнлегированных инструментальных сталей лучше использовать более прочные керамические формы. Также возможно отливать заготовки из таких сталей и в песчаные или другие формы, если их конструкция весьма простая или после литья используется, например, их перековка.

Из рис. 3 и табл. 2 видно, что вполне возможно и термическое упрочнение деталей переменного сечения из сталей типа 4X5MФ1С с использованием закалки в масле от температуры 1150 °С, когда на поверхности обеспечивается практически одинаковая твердость при наличии толщины сечения 33, 63 и 83 мм. Необходимо только правильно подобрать время нахождения деталей в печи при температуре закалки,

чтобы избежать перегрева более тонких сечений. Можно использовать нанесение соответствующего слоя защитной обмазки на более тонкие сечения при проведении высокотемпературного нагрева.

Микроструктура стали после проведения закалки в масле от температуры 1150 °С и отпуска в достаточной степени однородна и пригодна при использовании в качестве матриц и пуансонов пресс-форм литья изделий из алюминиевых сплавов. Для повышения ресурса работы также возможно проведение дополнительного диффузионного карбонитрирования в обмазке при температуре 520 °С рабочих поверхностей после отпуска матриц и пуансонов. Составы обмазок для такого поверхностного упрочнения уже разработаны [3].

Выводы

1. Разработан новый оптимизированный режим термической обработки, включающий закалку в масле от температуры 1150 °С и отпуск при температуре 500–650 °С в течение 1,5–2,0 ч и позволяющий в достаточной степени повысить уровень упрочнения сталей типа 4Х5МФ1С в литых и кованных заготовках сечением до 83 мм и более. Этот режим может быть использован и для термического упрочнения деталей из стали 4Х5МФС.

2. Эффект повышения уровня упрочнения вызван более полным растворением исходной матрицы стали в результате высокотемпературного нагрева при 1150 °С по сравнению с общепринятым нагревом при 1040 °С, особенно у поверхности, укрупнения зерен и морфологии выделившихся первичных фаз структуры при закалке и увеличения количества вторичных фаз в результате отпуска, не наблюдаемое на фотографиях.

3. Разработанный режим термического упрочнения можно использовать и при термической обработке деталей переменного сечения с необходимой доработкой схемы проведения для каждого конкретного случая.

4. Результаты работы могут использоваться при производстве рабочих частей инструмента для горячего формообразования повышенного ресурса эксплуатации.

Литература

1. Федулов В. Н. Влияние условий охлаждения и размера заготовки при литье инструментальной стали на способность к последующему термическому упрочнению поверхности // Литье и металлургия. 2016. № 3. С. 117–127.
2. Федулов В. Н. Инструментальная сталь. Заявка на патент, №а 20160501 от 29.12. 2016 г. Заявитель БНТУ. 5 с.
3. Федулов В. Н. Обмазка для диффузионного карбонитрирования стальных изделий. Заявка на патент, № а 20160204 от 03.06. 2016 г. Заявитель БНТУ. 6 с.

References

1. Fedulov V. N. Vlijanje uslovij ohlazhdenija i razmera zagotovki pri lit'e instrumental'noj stali na sposobnost' k posledujushhemu termicheskomu uprochneniju poverhnosti [Influence of cooling conditions and the size of stock material during the casting of tool steel on capability to the subsequent thermal hard-facing]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 117–127.
2. Fedulov V. N. *Instrumental'naja stal'* [Tool steel]. Patent RB, no. 20160501, 2016.
3. Fedulov V. N. *Obmazka dlja diffuzionnogo karbonitrirovanija stal'nyh izdelij* [Coating for diffusion carbonitriding of steel products]. Patent RB, no. 20160204, 2016.