



УДК 621.74

Поступила 25.04.2016

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ОХЛАЖДЕНИЯ И РАЗМЕРА ЗАГОТОВКИ ПРИ ЛИТЬЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ НА СПОСОБНОСТЬ К ПОСЛЕДУЮЩЕМУ ТЕРМИЧЕСКОМУ УПРОЧНЕНИЮ ПОВЕРХНОСТИ

INFLUENCE OF COOLING CONDITIONS AND THE SIZE OF STOCK MATERIAL DURING CASTING OF TOOL STEEL ON CAPABILITY TO THE SUBSEQUENT THERMAL HARD-FACING

В. Н. ФЕДУЛОВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр-т Независимости, 65. Тел. +375-29-651-09-85

V. N. FEDULOV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. Tel. +375-29-651-09-85

Исследовано влияние условий охлаждения и размера отливки инструментальной стали 4Х5МФ1С на способность к упрочнению после высокого отпуска при температуре 500–650 °С. Дано сравнение с упрочнением поковок.

Influence of cooling conditions and the size of stock material of instrumental steel 4H5MF1S on capability to surface hardening after high-temperature tempering at 500–650 °C is investigated. Comparison with hardening of forgings is given.

Ключевые слова. Инструментальная сталь, литье, структура, поковка, твердость, высокий отпуск.

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

Элементы структуры, определяющие прочность твердого металла и образующиеся после заливки в форму и затвердевания жидкого металла при охлаждении на воздухе, должны быть более устойчивы при последующем отпуске по сравнению с элементами структуры, образующимися в твердом металле после деформации и также охлаждения на воздухе. То же самое относится и к условиям охлаждения металла при получении отливок: чем выше скорость охлаждения, тем более восприимчив твердый металл к своему упрочнению [1].

В связи с этим исследовали влияние условий охлаждения и размера заготовки при изготовлении отливок из инструментальной стали 4Х5МФ1С [2] на уровень ее упрочнения в поверхностных слоях и сравнивали его с поковками подобного размера. Для этого заготовки отливали в керамические изложницы, изменяя диаметр отливки от 33 до 63 и 83 мм при высоте, равной 150 мм и примерно одинаковом химическом составе стали. Для исследования влияния диаметра поковки на уровень упрочнения стали их ковали до диаметров 33 и 63 мм и высотой также 150 мм. Поковки изготавливали при примерно равных условиях и на одном и том же молоте. Масса падающих частей молота составляла 250 кг. Ковку производили по одной и той же схеме: осадка, а затем протяжка и доведение до требуемого размера. В табл. 1 приведены условия получения отливок и поковок при проведении исследования, а в табл. 2 – химический состав стали.

Таблица 1. Полуфабрикаты инструментальной стали и способы их получения

Номер марки стали	Марка стали	Вид	Способ получения полуфабриката
1	4Х5МФ1С	Поковка	Ковка до круга диаметром 33×150 мм, охлаждение после ковки на воздухе
2	4Х5МФ1С	Отливка	Литье в керамическую изложницу, диаметр 33×150 мм, быстрое охлаждение
3	4Х5МФ1С	Отливка	То же, но изложница утеплена в песке и охлаждение медленное
4	4Х5МФ1С	Поковка	Ковка на диаметр 63 мм и высотой 150 мм, охлаждение после ковки на воздухе
5	4Х5МФ1С	Отливка	Литье в утепленную керамическую изложницу, диаметр отливки 63 мм, высота 150 мм, охлаждение медленное
6	4Х5МФ1С	Отливка	То же, но диаметр отливки 83 мм, высота 150 мм

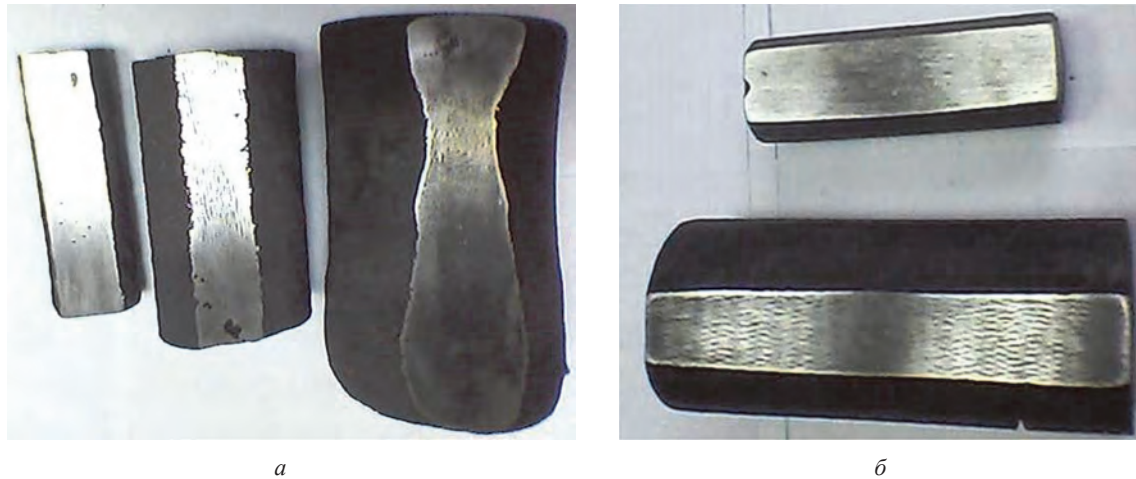


Рис. 1. Общий вид образцов отливок (а) диаметром 33, 63 и 83 мм и поковок (б) диаметром 33 и 63 мм, подвергавшихся исследованию для стали 4X5MФ1С

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

Наименование полуфабриката и марка стали	Содержание элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni
Поковки стали 4X5MФ1С, № 1, 4	0,42	1,2	0,36	5,0	1,2	0,90	0,3
Отливки стали 4X5MФ1С, № 2, 3, 5, 6	0,42	1,35	0,35	5,0	1,2	0,90	0,3

Т а б л и ц а 3. Механические свойства сталей у поверхности полуфабрикатов без термической обработки и после высокого отпуска

Номер стали	Твердость у поверхности HRC после отпуска при температуре, °С							
	Без термической обработки	500, 1,5 ч	525, 1,5 ч	550, 1,5 ч	575, 1,5 ч	600, 1,5 ч	625, 1,5 ч	650, 1,5 ч
1.	55	55	56	55–56	54	52	45–46	40–41
2.	55	56	58	57,5–58	55–56	54–55	50	45
3.	52–53	53–54	56–57	56–57		53–54	49–50	43,5–44
4.	52–53	54		55		50,5–51		39
5.	52–53	55		57		51,5–52		42–43
6.	52–53	55–56		57		51–52		39–40

В начале отливок диаметром 33 и 60 мм и поковки диаметром 33 мм отрезали образцы длиной 100 мм и с противоположных сторон шлифовали «лыски» для замера твердости. Для поковки диаметром 63 мм и отливки диаметром 83 мм отрезку образцов не производили из-за технической сложности, а обеспечили только наличие «лысок» с двух сторон. Общий вид полученных образцов показан на рис. 1. Измеряли твердость сталей у поверхности полученных полуфабрикатов. Результаты приведены в табл. 3. Из таблицы видно, что твердость стали поковки (№ 1) и отливки (№ 2), быстроохлажденной в тонкостенной форме на воздухе при диаметре 33 мм, примерно равна и составляет около 55 HRC. Твердость стали у отливок, подвергнутых замедленному охлаждению диаметром 33, 63 и 83 мм, и поковки диаметром 63 мм также примерно одинакова – 52–53 HRC (№ 3, 5, 6 и 4).

После быстрого и медленного охлаждения литая сталь имеет схожее дендритное строение (рис. 2, 3). Однако после быстрого охлаждения 35% зерен дендритов имеет средний размер до 25 мкм и 35% – 150–175 мкм (рис. 2). После медленного охлаждения те же 35% зерен имеют средний размер 150–175 мкм, однако мелких зерен у дендритов стало меньше (рис. 3). Размеры дендритов приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что размеры зерен колеблются в широком диапазоне значений, хотя максимальное количество зерен отвечает приведенным выше размерам.

В результате быстрого охлаждения в теле дендрита образуется структура стали мартенситного типа (рис. 5). Карбидная фаза не определяется. Междендритное пространство – видоизмененный феррит (субструктурированная светлая составляющая). На фоне видоизмененного феррита располагаются очень

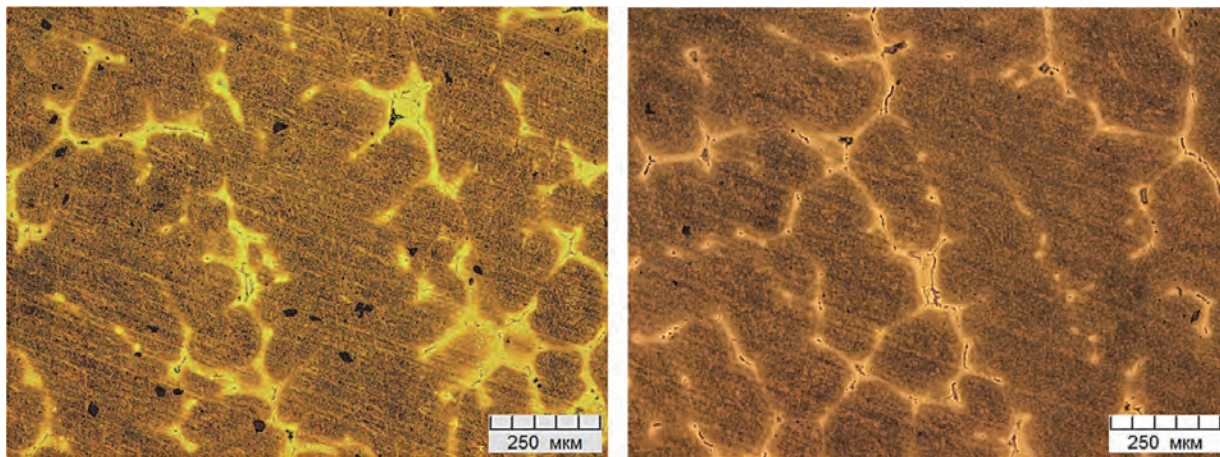


Рис. 2. Литая структура стали 4X5MФ1С в прибыльной части после быстрого охлаждения отливки 4X5MФ1С диаметром 33 мм и длиной 150 мм

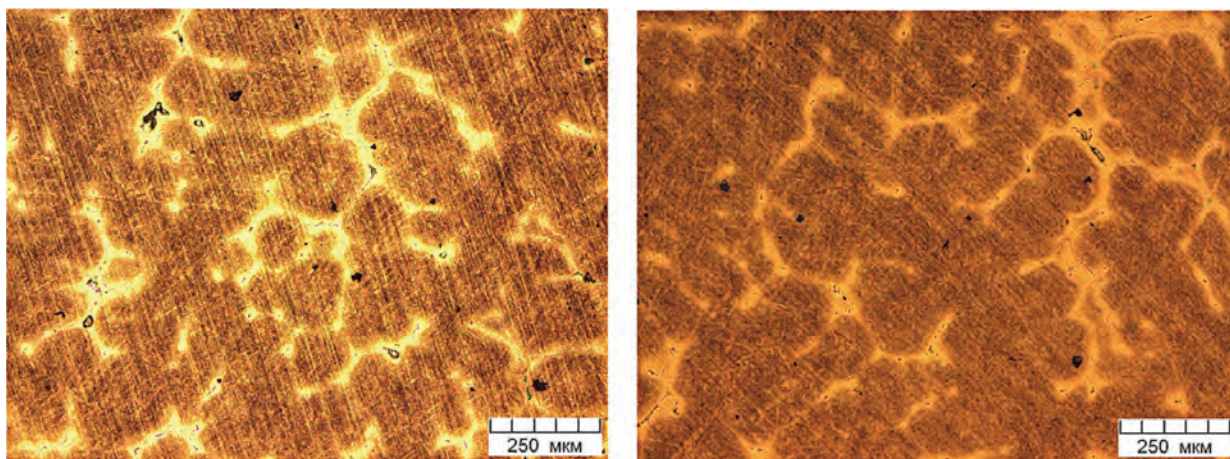


Рис. 3. Литая структура стали 4X5MФ1С в прибыльной части отливки диаметром 33 и длиной 150 мм после медленного охлаждения

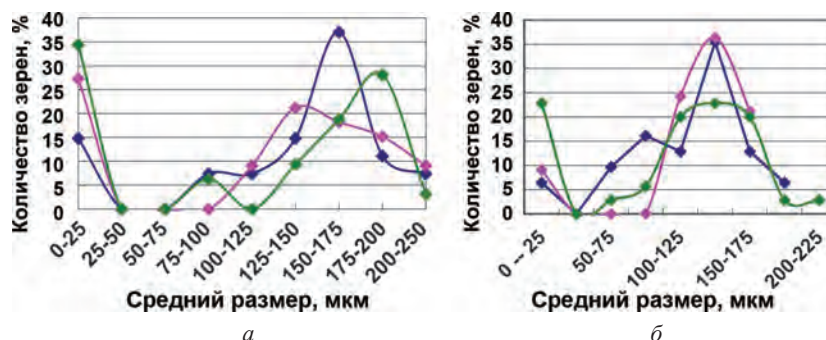


Рис. 4. Средний размер зерна дендритов литой стали 4X5MФ1С после быстрого (а) и медленного (б) охлаждения отливок (по трем кадрам)

мелкие первичные карбиды. В образце наблюдаются дефекты литья, так как он был вырезан из прибыльной части, и карбидные включения. Карбидная составляющая размещается в междендритном пространстве или рядом с ним и в таких участках, вероятно, могут быть сложные по строению карбиды. Также присутствуют другие виды микроструктур стали (рис. 6), когда, очевидно, в ее составе можно обнаружить остаточный аустенит или какую-либо форму ферритообразной составляющей, образовавшейся из аустенита, а также расположение неустановленных по составу фаз.

После медленного охлаждения в теле дендритов наблюдается более крупная структура мартенситного типа, образовавшаяся, по всей видимости, из γ -фазы (рис. 7). Однако есть и другое отличие: в некоторых участках на фоне тела дендрита четко выявляются границы новых зерен (рис. 7). Причем формирование границ зерен не ограничено пределами одного конкретного дендрита. На рис. 8 выделена область (синий овал), описывающая один полный дендрит длиной 140 мкм и шириной 50 мкм. При большем

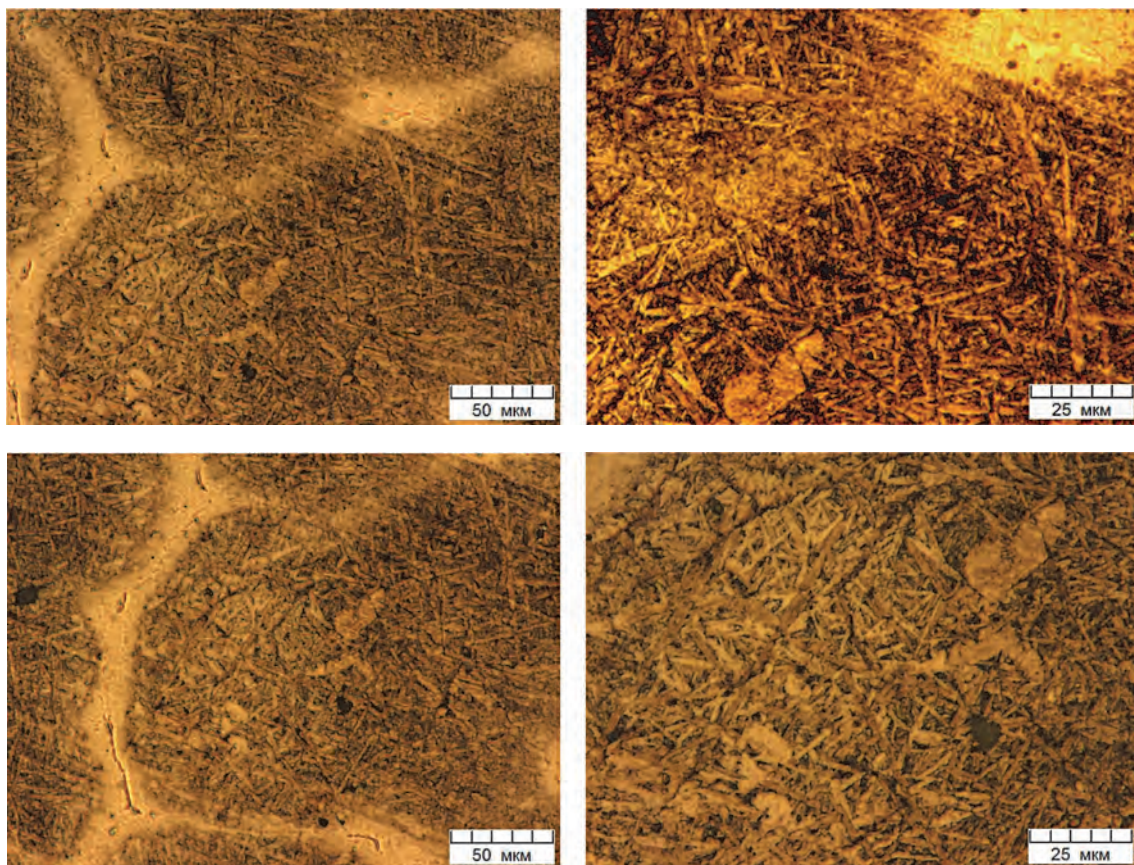


Рис. 5. Наиболее типичная внутризеренная структура литой стали 4X5MФ1С у быстроохлажденной отливки диаметром 33 мм и длиной 150 мм

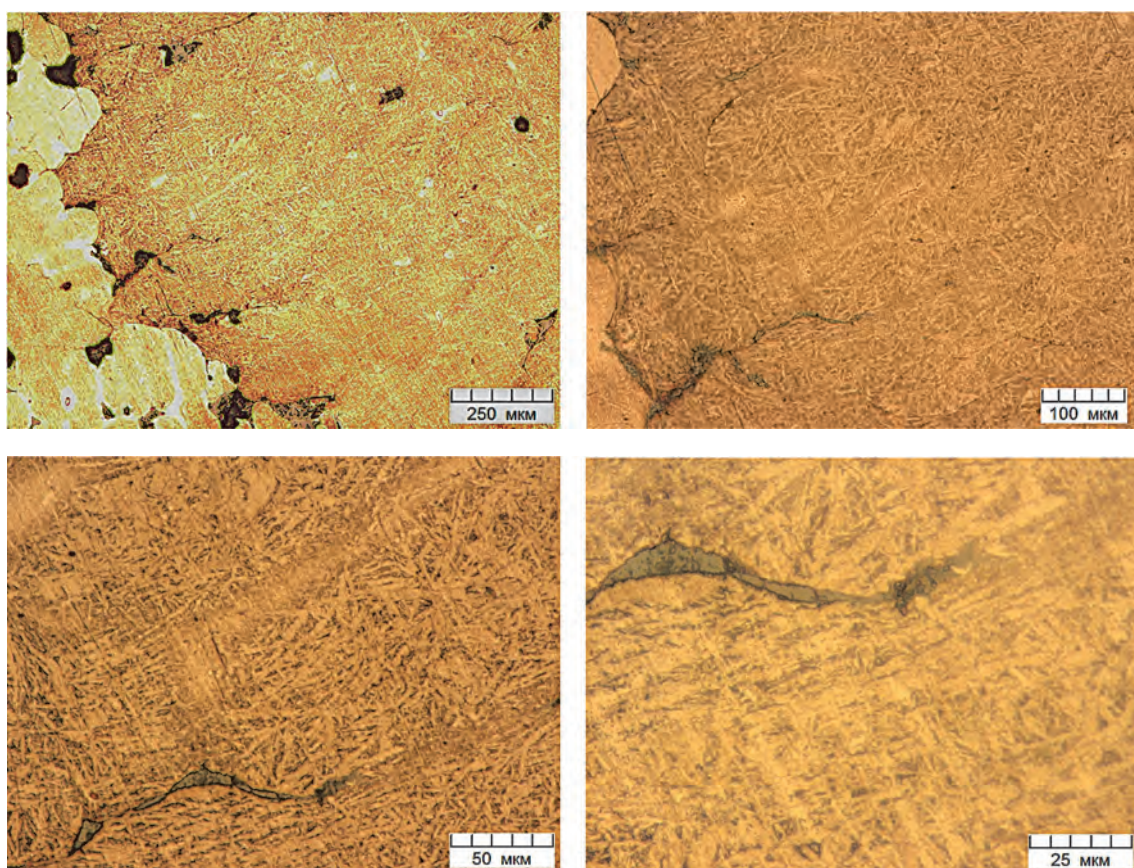


Рис. 6. Встречающаяся по сечению микроструктура стали 4X5MФ1С после быстрого охлаждения отливки диаметром 33 мм и длиной 150 мм

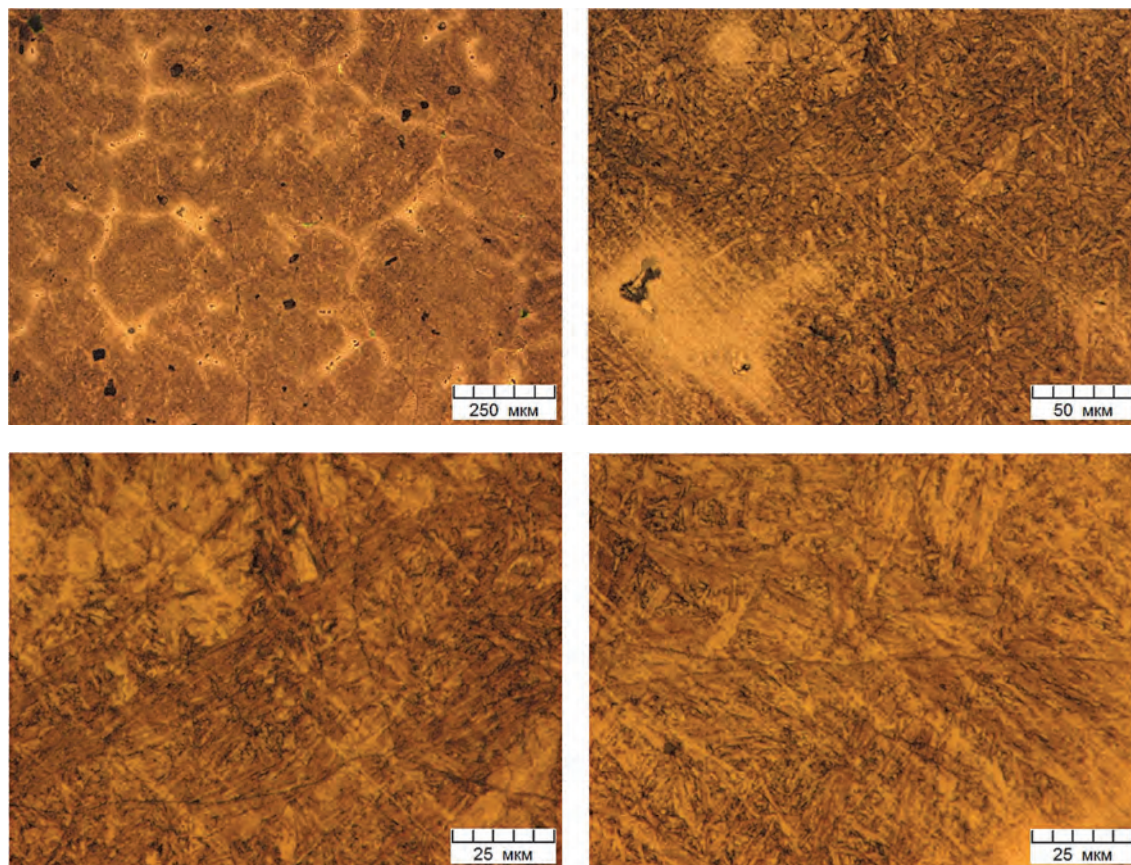


Рис. 7. Типичная внутризеренная микроструктура литой стали 4X5MФ1С в медленно охлажденной отливке диаметром 33 мм и длиной 150 мм

увеличении четко видно зерно, сформировавшееся на теле данного и соседнего дендритов. Размер второго зерна: длина – 100 мкм, ширина – 70 мкм. Образовавшиеся новые зерна имеют внутризеренную структуру с наличием субструктурированных фаз. Следовательно, при медленном охлаждении в некоторых участках произошла перекристаллизация.

На фоне сохранившегося междендритного ферритообразного и субструктурированного мартенсита присутствуют очень мелкие и редкие карбиды в обоих случаях охлаждения отливок. Имеют место в структуре, вероятно, и сложные первичные карбиды. Величина их размера должна составлять порядка 5 мкм.

Отличия в образовавшейся микроструктуре отливок одного и того же размера при их быстром и медленном охлаждении при проведении эксперимента определили различие в твердости стали у поверхности (табл. 3, № 2, 3). Разница в твердости составляет около 2,0–2,5 ед. HRC. Она вызвана тем, что медленно охлажденная отливка имеет более крупное внутризеренное строение стали и присутствие светлой составляющей в ней несколько меньшее.

Таким образом, подтверждением отличия процессов, протекающих в отливке при медленном охлаждении, является не только происходящая перекристаллизация структуры (рис. 8). Помимо формирования новых γ -зерен, происходит изменение количества светлой составляющей (рис. 9). После быстрого охлаждения доля площади, занимаемая светлой частью структуры, составляет 12,5%, а уже после медленного охлаждения – только 9,27%.

Можно также отметить, что процесс формирования новых границ зерен до конца не завершён: может потребоваться повторный нагрев.

Подобные процессы протекают и при получении отливок диаметром 63 и 83 мм, где процессы перекристаллизации должны протекать более значительно, а количество светлой составляющей должно уменьшаться, хотя эффект упрочнения является примерно равным эффекту упрочнения стали в отливке диаметром 33 мм при медленном ее охлаждении.

Различия в построении микроструктуры, как в отливках разного диаметра, так и в поковках, начинают сказываться после проведения высокого отпуска при температуре от 500 до 650 °С (табл. 3). Поковка диаметром 33 мм (табл. 3, № 1, рис. 10, а) проигрывает в уровне упрочнения отливке из той же стали

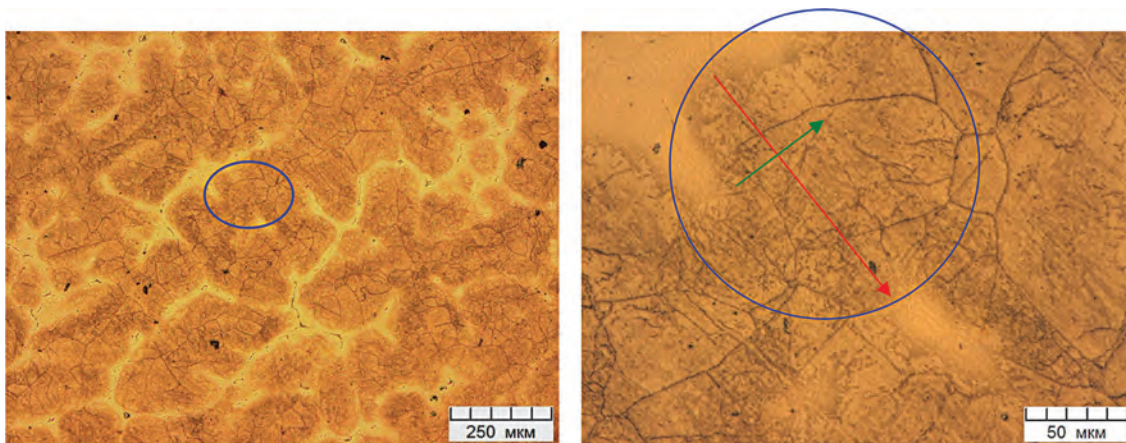
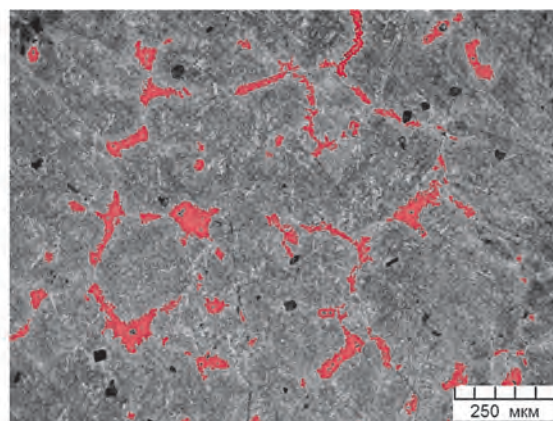
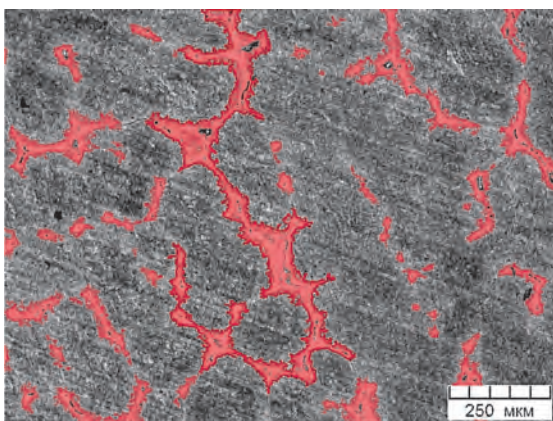
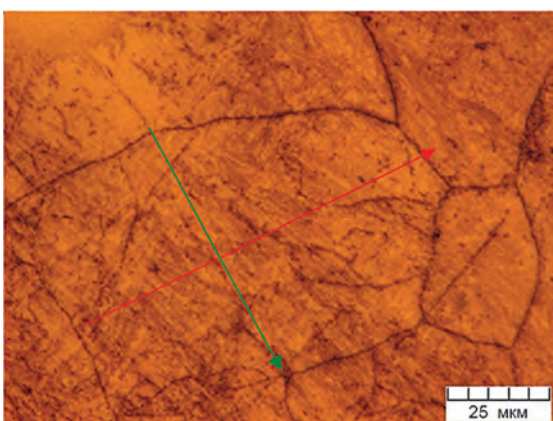


Рис. 8. Микроструктура стали образца отливки диаметром 33 мм и длиной 150 мм после медленного охлаждения с наличием признаков ее перекристаллизации



a

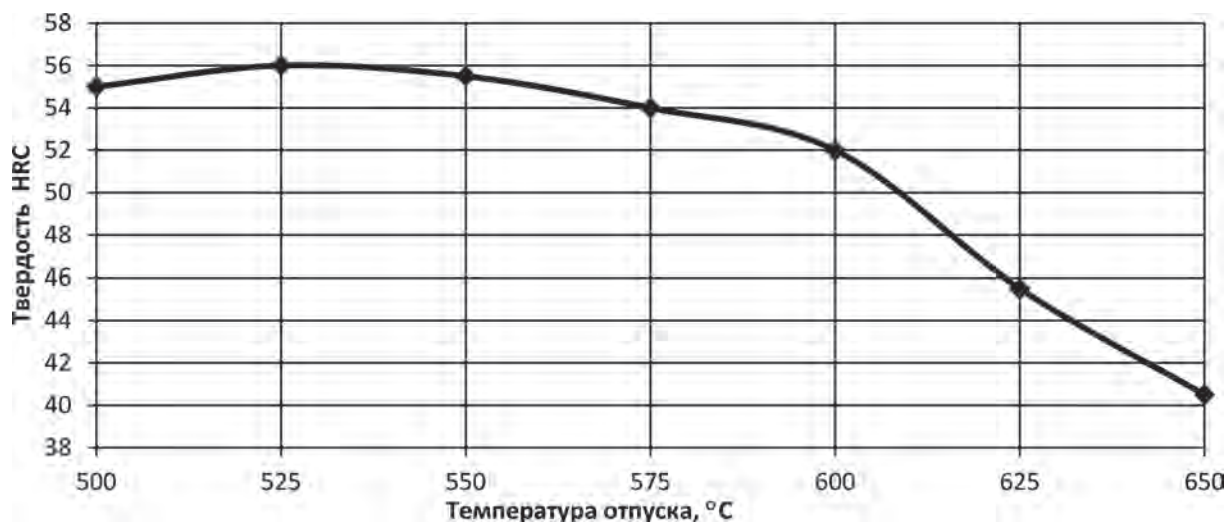
б

Рис. 9. Доля субструктурированной ферритообразной составляющей (красная) у стали после быстрого (*a*) и медленного (*б*) охлаждения отливок диаметром 33 мм: *a* – быстрое охлаждение –12,5%; *б* – медленное охлаждение – 9,27%

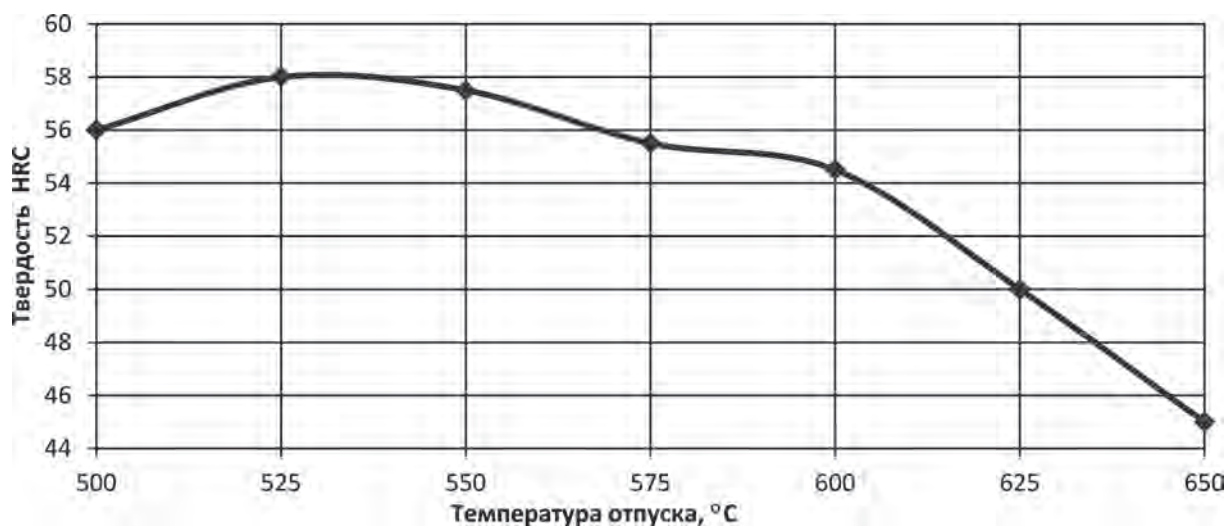
и такого же диаметра (табл. 3, № 2, рис. 10, *б*) после быстрого охлаждения их на воздухе во всем интервале температур отпуска, в особенности при нагреве выше 600 °С.

Этот факт подтверждает идею автора о том, что структурные составляющие литого металла, отвечающие за уровень прочности, более отпускостойчивые по сравнению со структурными составляющими деформированного металла. Отливка того же диаметра, но при медленном охлаждении (табл. 3, № 3, рис. 10, *в*) несколько проигрывает в уровне упрочнения металлу отливке с быстрым охлаждением, но также имеет более высокий уровень твердости при отпуске с нагревом 600 °С и выше, чем поковка того же диаметра.

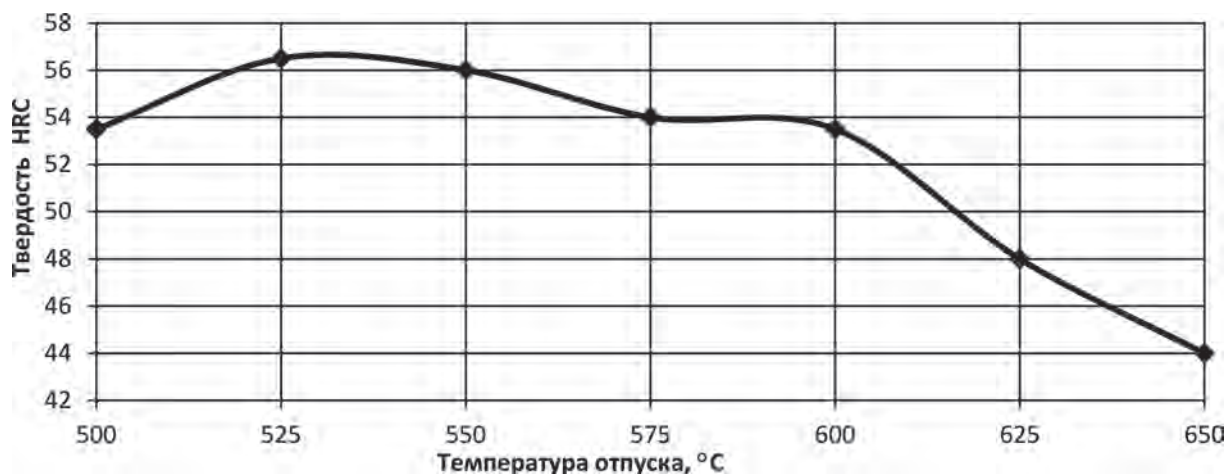
Увеличение размеров поковки и отливки до диаметра 63 мм уменьшает тенденцию к упрочнению стали по сравнению с отливками и поковкой диаметром 33 мм, хотя и незначительно при отпуске до 600 °С. Но более значителен этот эффект при дальнейшем повышении температуры нагрева вплоть до 650 °С (табл. 3, № 4, 5 и рис. 11, *a, б*). Примечательно, что именно в этом интервале температуры отпуска поковка опять имеет уровень упрочнения ниже, чем отливка. Повышение массы отливки при диаметре 83 мм



a



б

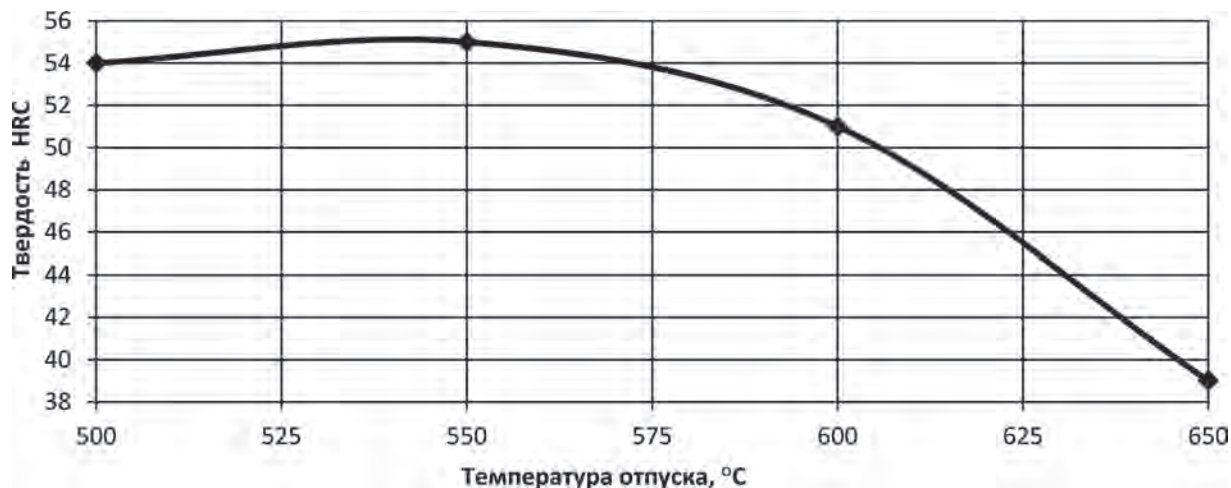


в

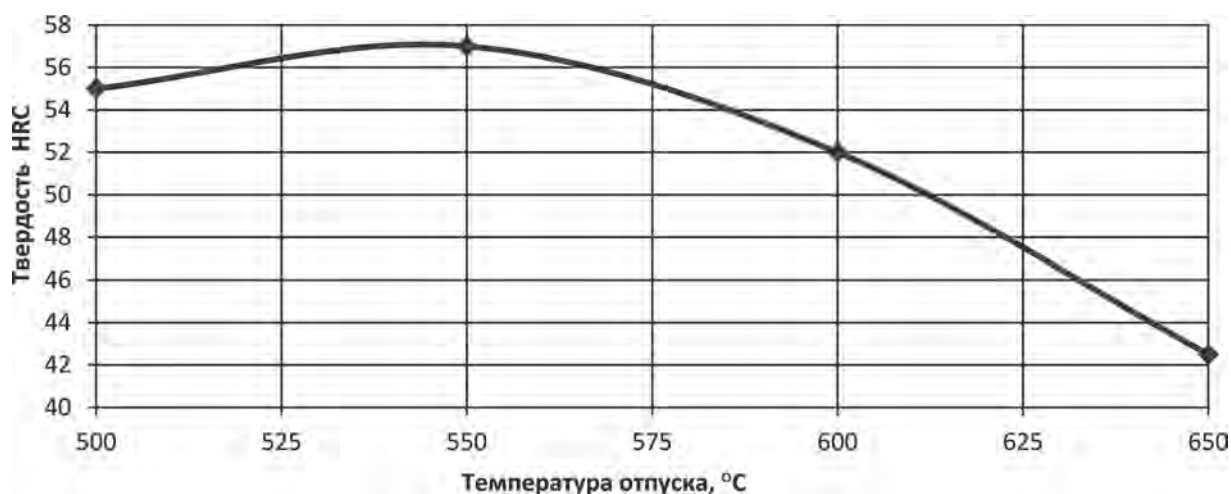
Рис. 10. Изменение твердости стали 4X5MФ1C от температуры отпуска поковки (а), отливки диаметром 33 мм с быстрым (б) и медленным (в) охлаждением

также вызывает уменьшение уровня упрочнения стали в том же диапазоне температур отпуска (табл. 3, № 6 и рис. 11, в).

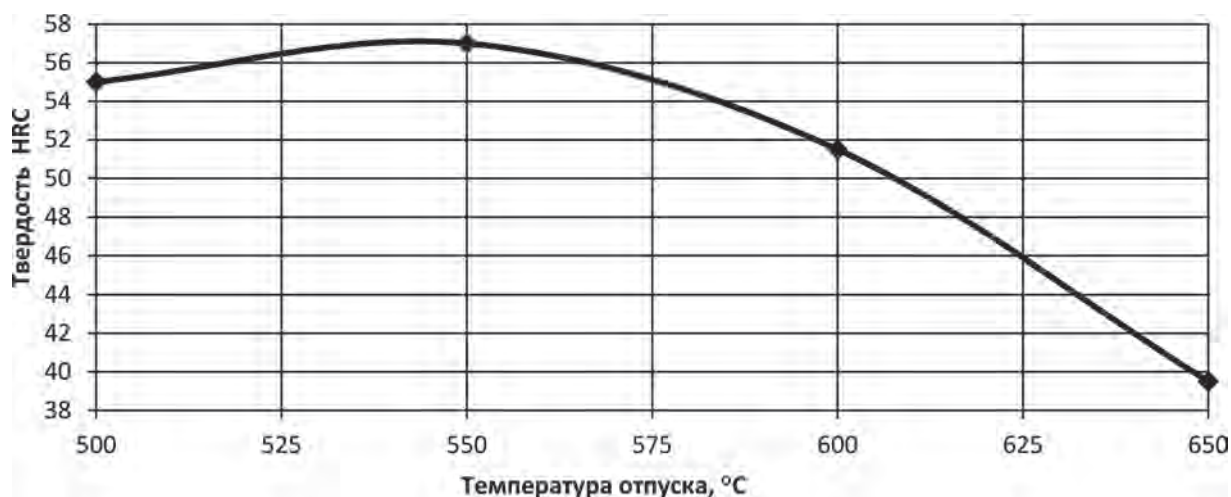
Исследовали микроструктуру литой стали 4X5MФ1C после проведения отпуска при температуре нагрева 550 °C в течение 1,5 ч для образцов отливок диаметром 33 мм после их быстрого и медленного охлаждения (рис. 12, 13).



a



б



в

Рис. 11. Зависимость твердости стали 4X5MФ1С от температуры отпуска поковки (*a*) и отливки диаметром 63 мм (*б*) и отливки диаметром 83 мм (*в*)

Отпущенные при температуре 550 °C образцы также были прошлифованы, заполированы и протравлены. Для обоих случаев, как с быстрым, так и с медленным охлаждением, обнаружилась микроструктура стали, мало отличающаяся от литого состояния стали без проведения дополнительных нагревов (см. рис. 2 и рис. 12, *a*, рис. 5 и рис. 13, *a*). Микроструктура литой стали после проведения указанного отпуска внутри зерна (дендрита) в отливке с быстрым охлаждением является мартенситом отпуска, а в отливке с медленным охлаждением – троостомартенситом отпуска (см. рис. 3 и рис. 12, *б*, рис. 7 и рис. 13, *б*).

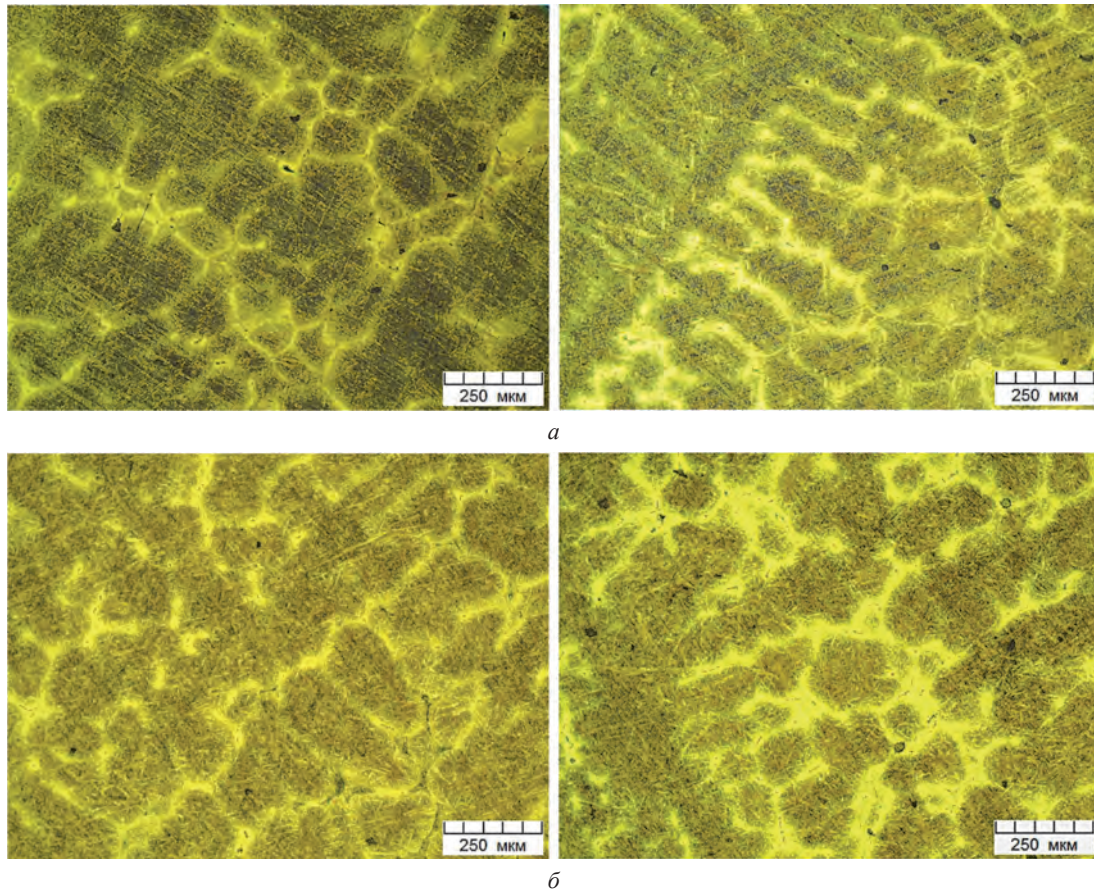


Рис. 12. Типичная микроструктура литой стали 4X5MΦ1С после отпуска при температуре 550 °С в течение 1,5 ч в образцах отливок диаметром 33 мм, полученных литьем с быстрым (а) и медленным (б) охлаждением

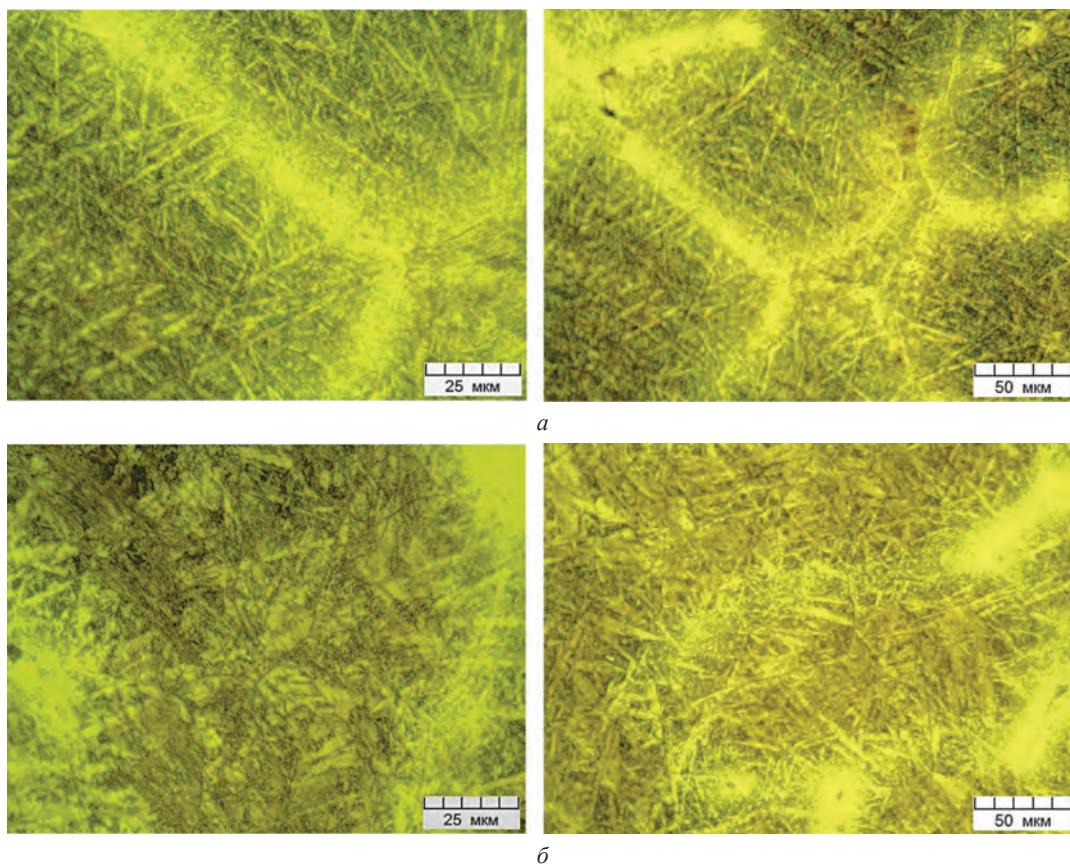


Рис. 13. Внутризеренная микроструктура литой стали 4X5MΦ1С после отпуска при температуре 550 °С в течение 1,5 ч у образцов отливок диаметром 33 мм, полученных литьем с быстрым (а) и медленным (б) охлаждением

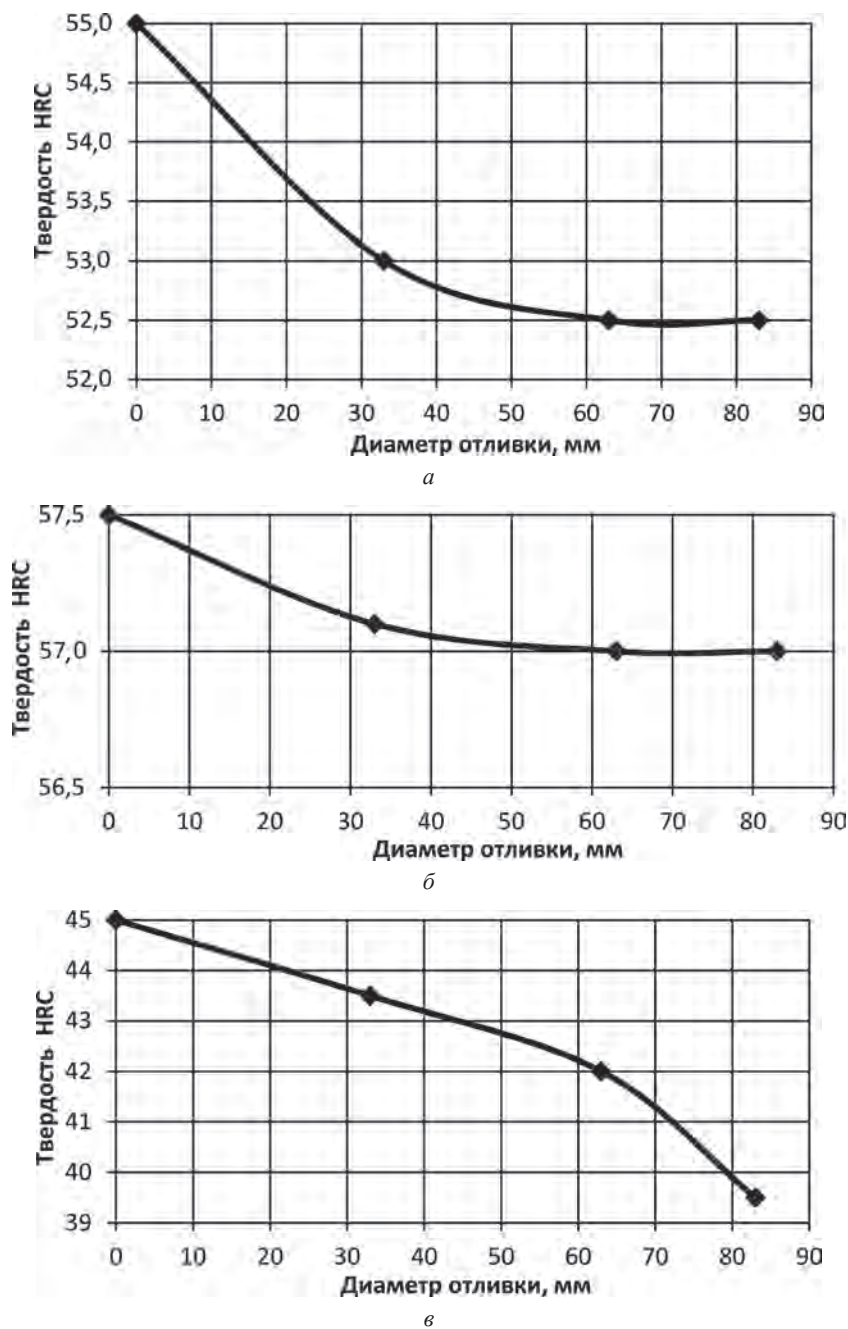


Рис. 14. Зависимость твердости стали у поверхности отливки от ее диаметра: *а* – сталь 4X5MФ1С сразу после литья; *б* – сталь 4X5MФ1С после литья и отпуска 550 °С, 1,5 ч; *в* – сталь 4X5MФ1С после литья и отпуска 650 °С, 1,5 ч

Это связано с тем, что при таких температурах отпуска происходит вторичное твердение литой стали с выделением очень мелких карбидов M_2C , которые при таком увеличении не видны.

Выводы

1. Литая сталь имеет более высокий уровень упрочнения при проведении только высокого отпуска во всем интервале и выше по сравнению с кованным состоянием из-за более устойчивого состояния структуры к таким последующим нагревам.

2. Увеличение размера поковок и отливок (рис. 11 и 14, *а*, *б*, *в*) также приводит к снижению уровня упрочнения как сразу после литья иликовки, так и после высокого отпуска. Это явление связано уже с укрупнением и упорядочением внутризеренной структуры и снижением относительного присутствия дефектов структуры: они более склонны к релаксации при проведении последующего нагрева, особенно при температуре выше, чем 600 °С. При этом твердость после отпуска при 550 °С на поверхности отливок несколько выравнивается при увеличении диаметра до 83 мм (рис. 14, *б*), а при повышении температуры отпуска до 650 °С снова наблюдается разница с увеличением размера отливки (рис. 14, *в*).

Литература

1. Федулов В. Н. Влияние количественного легирования инструментальных сталей для горячего деформирования на уровень их упрочнения // Литье и металлургия. 2015. № 3(80). С. 123–131.
2. Геллер Ю. А. Инструментальные стали. 5-е изд. М.: Металлургия, 1983. С. 19.

References

1. Fedulov V. N. Vlijanie kolichestvennogo legirovanija instrumental'nyh stalej dlja gorjachego deformirovanija na uroven' ih uprochnenija [Effect of doping quantitative tool steels for hot deformation at the level of their hardening]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and Metallurgy*, 2015, no. 3(80), pp. 123–131.
2. Geller Ju. A. *Instrumental'nye stali* [Tool steel]. Moscow, Metallurgija Publ., 1983, 19 p.