

***Р. Р. Бочкова<sup>1</sup>, М. М. Абрамова<sup>2\*</sup>, М. В. Каравеева<sup>2</sup>***

<sup>1</sup>ООО «Вилабратор Аллевар Урал», г. Екатеринбург

<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

\**abramovamm@yandex.ru*

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОТПУСКА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ РКУП

В работе исследована возможность деформирования закаленного состояния высокоуглеродистой подшипниковой стали после отпуска при различных температурах. Деформацию осуществляли методом равноканального углового прессования. Показано, что в результате повышения температуры предварительного отпуска наблюдается снижение прочностных характеристик: предела прочности и предела текучести, твердости стали.

*Ключевые слова:* интенсивная пластическая деформация, подшипниковые стали, механические свойства.

***R. R. Bochkova, M. M. Abramova, M. V. Karavaeva***

## EFFECT OF PRE-TEMPERING TEMPERATURE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-CARBON BEARING STEEL AFTER ECAP

The possibility of deformation of the quenched state of high-carbon bearing steel after tempering at different temperatures has been investigated. The deformation was carried out by equal-channel angular pressing. It is shown the increasing of the temperature of the preliminary tempering results in a decrease in the strength characteristics: the tensile strength and yield strength, and the hardness of the steel.

*Keywords:* severe plastic deformation, bearing steel, mechanical properties.

Методы ИПД позволяют получать СМК и наноструктуры во многих металлах и сплавах. Эти методы успешно применялись для различных сталей (низко- и среднеуглеродистых, нержавеющей). Однако, исследования ИПД высокоуглеродистых сталей до настоящего времени изучены мало. К тому же показано, что деформация закаленного состояния может привести к повышенным значениям прочности для сталей [1], хотя при этом значительно усложняется сам процесс деформации. В связи с этим возрастает актуальность проведения экспериментальных исследований высокоуглеродистой стали при ИПД и подбор исходного состояния для деформации. В качестве исследуемого

материала была использована высокоуглеродистая подшипниковая сталь 1%С–1,5%Cr.

Для анализа влияния температуры отпуска (деформации) на свойства стали провели отпуск при температурах 300 °С, 400 °С и 500 °С в течение часа. Микроструктура стали после отпуска при различных температурах приведена на рис. 1. При температуре отпуска 300 °С в результате частичного распада мартенсита закалки образуется мартенсит отпуска, в котором наблюдается перераспределение углерода с начальным образованием карбидов. Отпуск при 400 °С приводит к завершению распада мартенсита на мелкодисперсную феррито-цементитную смесь, называемую трооститом отпуска. В структуре также присутствует частично не растворенная после закалки доля карбидов. В результате отпуска при 500 °С структура представляет собой сорбит отпуска с большим количеством высокодисперсных карбидов. В целом структура стали ШХ 15 после предварительного отпуска представлена феррито-карбидной смесью преимущественно пластинчатого типа.

Механические свойства приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что при повышении температуры отпуска значительно снижается прочность и твердость при некотором повышении пластичности за счет формирования более равновесного состояния в стали: феррито-карбидной смеси.

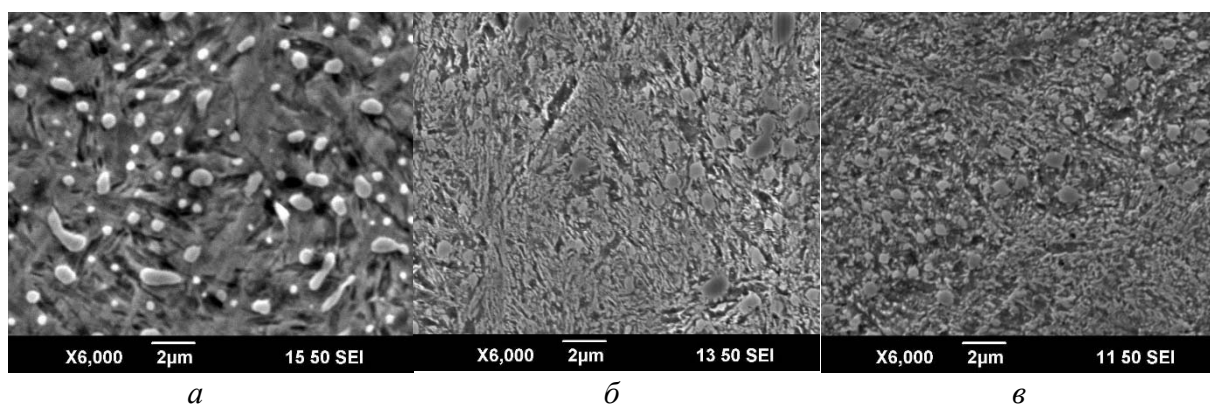


Рис. 1. Микроструктура стали ШХ15 после различной температуры отпуска  
*а* – 300 °С, *б* – 400 °С, *в* – 500 °С

Исследование микроструктуры после деформации показало, что во всех случаях формируется структура типа зернистого перлита, количество и размеры карбидной фазы зависят от режима обработки. Типичная микроструктура представлена на рис. 2. После РКУП наблюдаются сферические карбиды двух размерных фракций: со средним размером около 0,1 мкм и средним размером до 1 мкм, как видно на рис. 2.

Таблица 1

Механические свойства стали ШХ15 после предварительного отпуска

№	Состояние	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	HRC	$\delta$ , %	$\psi$ , %
1	Закалка: $T = 840$ °С – 0,5 час охлаждение в масле + $200$ °С – 1 ч.	2150	1956	65	< 1	< 1
2	Закалка: $T = 840$ °С – 0,5 час, охлаждение в масле + отпуск $T = 300$ °С – 1 ч.	1940	1800	61	2	< 1
3	Закалка: $T = 840$ °С – 0,5 час, охлаждение в масле + отпуск $T = 400$ °С – 1 ч.	1610	1370	52	3	9
4	Закалка: $T = 840$ °С – 0,5 час, охлаждение в масле + отпуск $T = 500$ °С – 1 ч.	1280	1030	45	8	34

Исследование микроструктуры после деформации показало, что во всех случаях формируется структура типа зернистого перлита, количество и размеры карбидной фазы зависят от режима обработки. Типичная микроструктура представлена на рис. 2. После РКУП наблюдаются сферические карбиды двух размерных фракций: со средним размером около 0,1 мкм и средним размером до 1 мкм, как видно на рис. 2.

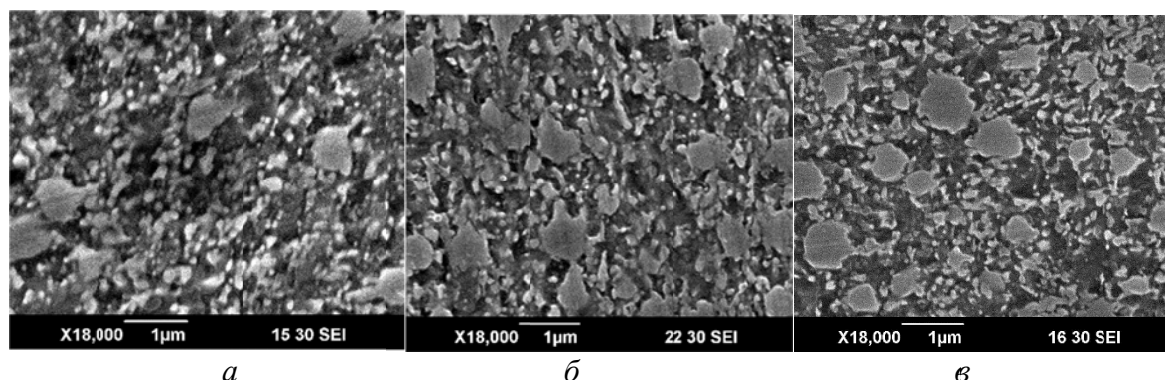


Рис. 2. Микроструктура стали ШХ15, подвергнутой РКУП после предварительного отпуска: *a* –  $300$  °С, *б* –  $400$  °С, *в* –  $500$  °С

Данные механических испытаний после различных режимов сочетания термической обработки и РКУП представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства стали ШХ15 после РКУП при  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$   
в зависимости от температуры отпуска

№	Обработка	$\bar{\sigma}_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	HRC	$\delta$ ,%	$\psi$ ,%
1	отпуск $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ +РКУП $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	1340	1300	43	2	18
2	отпуск $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ +РКУП $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	1260	1200	41	2,5	25
3	отпуск $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ +РКУП $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$	1150	1080	40	4	40

Анализ результатов механических испытаний показал, что повышение температуры предварительного отпуска приводит к снижению прочностных характеристик: предела прочности и предела текучести (рис. 3), а также твердости стали. Однако существенного повышения пластичности при этом не отмечено: равномерное удлинение при всех температурах в пределах  $\delta \sim 2,5\text{--}4\text{ }%$ .

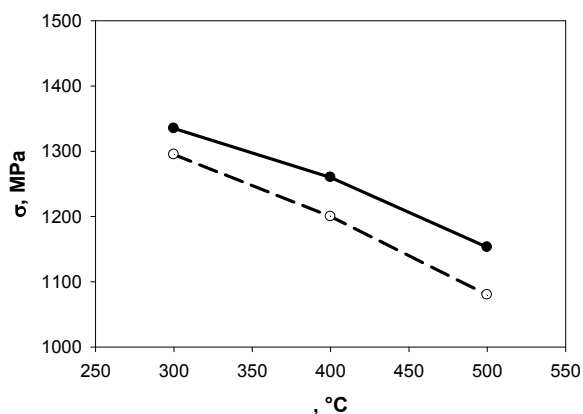


Рис. 3. Изменение предела прочности (сплошная линия) и предела текучести (штриховая линия) после РКУП стали при температуре  $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от температуры предварительного отпуска

Сопоставление данных позволяет сделать вывод, что пластическая деформация стали в отпущенном состоянии позволяет повысить прочностные характеристики. Это объясняется тем, что разупрочнение в процессе динамического отпуска превалирует над упрочнением в результате наклепа пластической деформации. К повышению

пластичности приводит измельчение структурных составляющих в результате интенсивной пластической деформации.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 17-48-020253.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Микроструктура и механические свойства среднеуглеродистой стали, подвергнутой интенсивной пластической деформации / М. В. Караваева [и др.] // МиТОМ. 2012. № 4. С. 4–7.