

**Юлия Владимировна Веретенникова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», г. Санкт-Петербург, Россия

\*npk3@crism.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ  
СВОЙСТВА, ХЛАДОСТОЙКОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННОЙ  
ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛИ ДЛЯ РАБОЧИХ УСТРОЙСТВ СУДОВ  
ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОГО ФЛОТА

В работе представлены результаты исследования механических свойств, хладостойкости и износостойкости среднеуглеродистой среднелегированной высокопрочной стали, рекомендуемой для изготовления элементов рабочих устройств дноуглубительной техники, после отпуска при разных температурах. Определены закономерности изменения прочностных и вязкопластических характеристик в зависимости от режима термической обработки. Установлено, что отпуск в интервале температур 560-580 °С является оптимальным и обеспечивает необходимое сочетание прочностных и вязкопластических свойств, а также позволяет повысить хладостойкость исследуемой стали.

*Ключевые слова:* среднеуглеродистая среднелегированная сталь, высокопрочная сталь, термическая обработка, механические свойства, хладостойкость, износостойкость, микроструктура.

**Julia V. Veretennikova**

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES,  
COLD RESISTANCE AND WEAR RESISTANCE OF MEDIUM-CARBON  
MEDIUM-ALLOYED HIGH-STRENGTH STEEL FOR WORKING DEVICES  
OF DREDGING SHIPS

The paper presents the results of a study of the mechanical properties, cold-resistance and wear-resistance of medium-carbon medium-alloy high-strength steel, recommended for the manufacture of elements of working devices of dredging equipment, after tempering at different temperatures. The patterns of changers in strength and plastic characteristics depending on the heat treatment regime and determined. It is established that tempering in the temperature range 560-580 °C is optimal and provides the necessary combination of strength and plastic properties, and also allows to increase the cold resistance of the steel.

*Keywords:* medium-carbon medium-alloy steel, high-strength steel, heat treatment, mechanical properties, cold-resistance, wear resistant, microstructure.

В настоящее время одним из приоритетных направлений развития инфраструктуры РФ является развитие логистического коридора Северного

морского пути с целью повышения объема и количества перевозок, что требует не только постройки новых атомных ледоколов, но и модернизации соответствующей портовой инфраструктуры, в том числе путем проведения дноуглубительных работ.

Материалы для дноуглубительной техники должны обладать высокой прочностью в сочетании с пластичностью, вязкостью и отсутствием склонности к хрупким разрушениям при низких температурах. Одним из основных требований к сталям для рабочих органов дноуглубительных судов также является стойкость к абразивному износу при контакте с такими средами, как песок, твердое минеральное сырьё и прочие агрессивные материалы, в условиях низких климатических температурах. Согласно устаревшей нормативной документации необходимо обеспечить уровень предела текучести – 350-400 МПа, относительное удлинение – 11-19 %, значения ударной вязкости – 20-50 Дж/см<sup>2</sup> при температуре плюс 20 °С. Однако, для решения текущих задач необходимо повысить хладостойкость и прочностные характеристики. Для эксплуатации в условиях воздействия абразивной среды твердость стали должна составлять 38-40 HRC, а предел текучести – не менее 1100 МПа, при этом значения ударной вязкости при температуре плюс 20 °С должны быть не ниже 40 Дж/см<sup>2</sup>.

В связи с этим, целью работы являлось исследование возможности повышения ударной вязкости и хладостойкости среднеуглеродистой среднелегированной высокопрочной стали, рекомендуемой для изготовления элементов дноуглубительной техники, при сохранении достаточной износостойкости путем разработки режимов термической обработки.

Основные задачи работы:

- Исследование влияния температуры отпуска на прочностные, пластические свойства и хладостойкость;
- Выбор оптимального режима термической обработки высокопрочной среднеуглеродистой среднелегированной стали;
- Оценка эксплуатационных характеристик стали (износостойкость).

Материалом для исследования была выбрана высокопрочная среднеуглеродистая среднелегированная сталь, химический состав исследуемой стали представлен в таблице.

Таблица

Химический состав исследуемой среднеуглеродистой среднелегированной стали

Массовая доля элементов, %										
C	Si	Mn+Ni+Cu	Cr+Mo	Ti	V+Nb	Al	Ca	B	S	P
0,37	0,26	2,06	1,15	0,03	0,03	0,06	0,01	0,03	0,009	0,006

Результаты испытаний механических свойств после различных режимов отпуска представлены на рисунке 1.

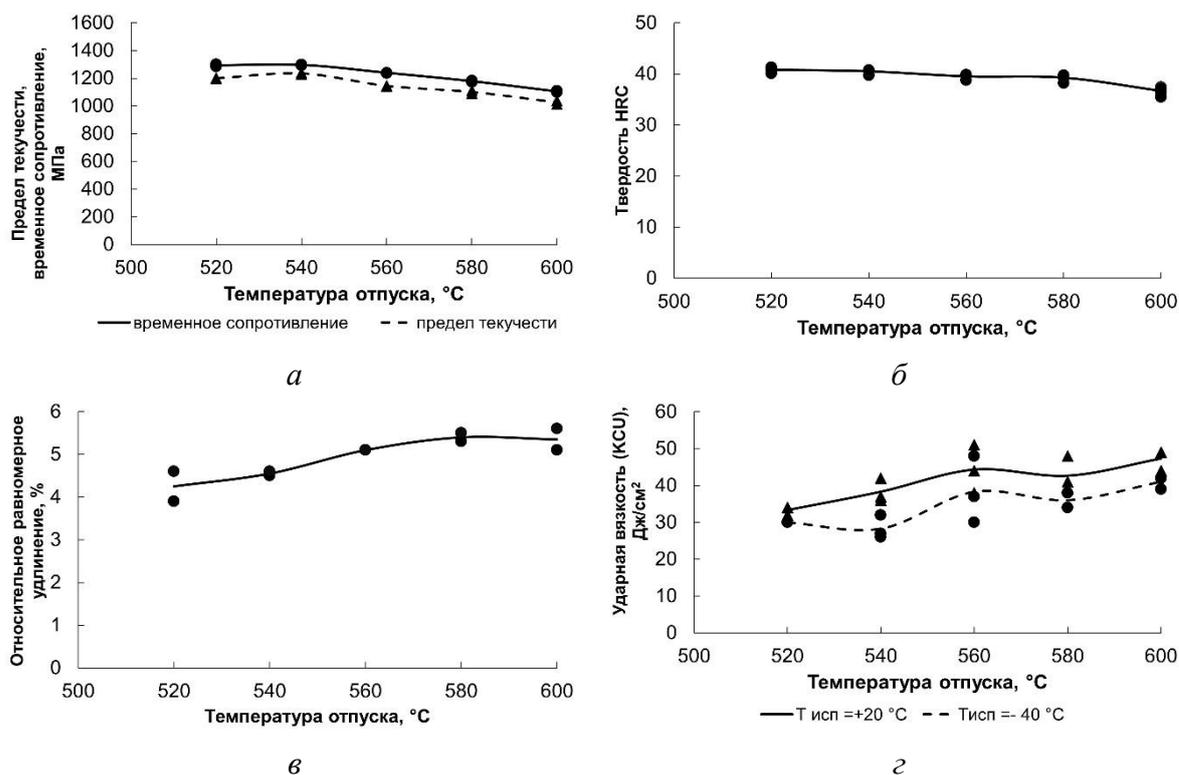
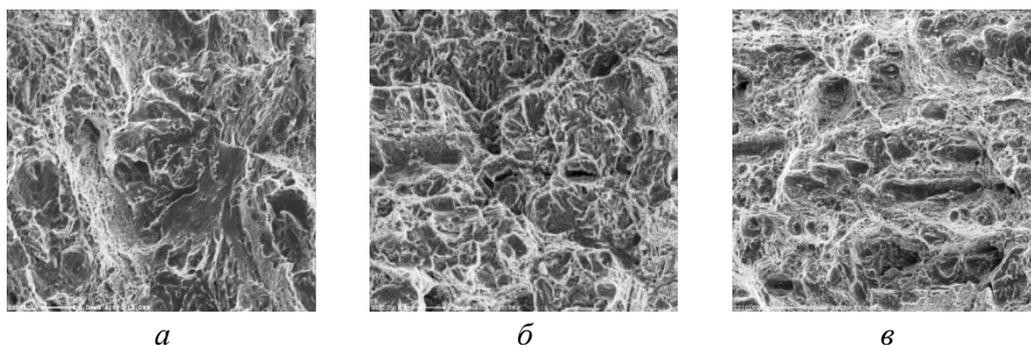


Рис. 1. Изменение механических свойств в зависимости от температуры отпуска: а - временное сопротивление, предел текучести, б – твердость по шкале Роквелла, в – относительное равномерное удлинение, г – ударная вязкость при температуре испытаний плюс 20 °С и минус 40 °С

Было установлено, что наиболее рациональным является отпуск в интервале температур 560-580 °С, который обеспечивает оптимальное сочетание уровня прочностных и вязкопластических свойств: предел текучести 1100-1140 МПа, временное сопротивление 1180-1230 МПа, относительное удлинение – 13-15 %, ударная вязкость при температуре 20 °С – 38-48 Дж/см<sup>2</sup>, а при температуре минус 40 °С - 36-38 Дж/см<sup>2</sup>. Значения относительного равномерного удлинения после отпуска в этом интервале температур наиболее высокие и составляют 5,1-5,4 % и коррелируют со значениями ударной вязкости, что может являться одним из показателей, характеризующих сопротивление хрупкому разрушению.

На рисунке 2 приведены фотографии поверхности разрушения образцов на ударный изгиб после отпуска при температурах 520 °С, 560 °С и 580 °С, испытанных при температурах плюс 20 °С и минус 40 °С.



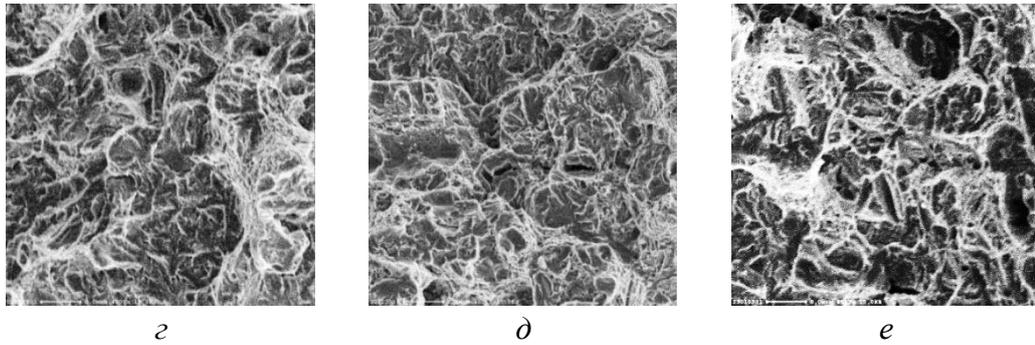
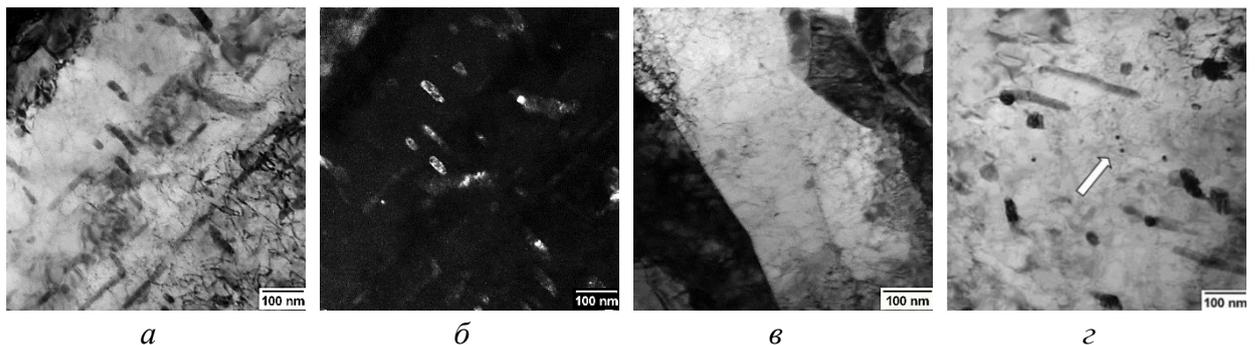


Рис. 2. Изображение поверхности разрушения образцов после отпуска при температуре 520 °С (а, г), 560 °С (б, д), 580 °С (в, е):  
 а, б, в - испытания при температуре испытаний плюс 20 °С;  
 г, д, е - испытания при температуре испытаний минус 40 °С

Рельеф поверхности разрушения образцов, испытанных при температуре плюс 20 °С, после отпуска при температуре 520 °С образован участками вязкого транскристаллитного и интеркристаллитного разрушения, а также площадками с заглаженным рельефом, которые образуются на границах скоплений неметаллических включений, рисунок 2 а. Повышение температуры отпуска до 560-580 °С приводит к сокращению доли площадок с заглаженным рельефом и интеркристаллитного разрушения, что способствует повышению энергоёмкости процесса разрушения и, следовательно, повышению уровня работы удара, рисунок 2 б, в.

Разрушение образцов, испытанных на ударный изгиб при температуре минус 40 °С, после отпуска при температуре 520 °С происходит псевдохрупко с образованием рельефа типа квазискол, рисунок 2 г. Повышение температуры отпуска приводит к смене механизма разрушения образцов при температуре испытания минус 40 °С, сокращению доли участков квазискола и образованию на их месте областей вязкого транскристаллитного разрушения, с чашечным рельефом, однако чашки имеют меньший диаметр и высоту утяжек, чем у образцов, испытанных при комнатной температуре, рисунок 2 д, е.

Исследования методами ПЭМ позволили уточнить особенности структурных изменений исследуемой стали. Типичные участки структуры стали после отпуска при температурах 520 °С, 560 °С и 580 °С представлены на рисунке 3. Установлено, что изменение температуры отпуска оказывает существенное влияние на состояние и распределение карбидной фазы по границам и в теле структурных элементов и уровень плотности дислокаций.



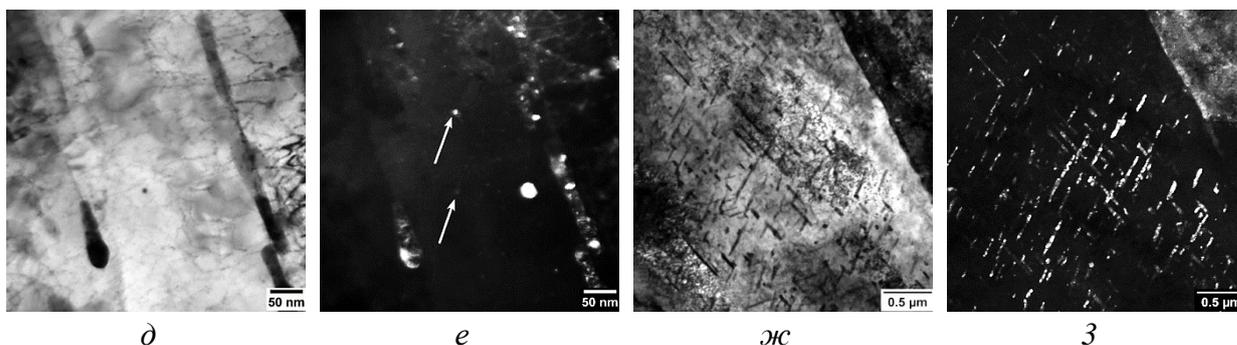


Рис. 3. Структура образца после отпуска:

- 520 °С – *а* - ВМ с карбидами самоотпуска; *б* - карбиды самоотпуска, темнопольное изображение в рефлексе (001)  $Fe_3C$ ;
- 560 °С – *в* - специальные карбиды внутри рек РМ; *г* - распределение специальных карбидов самоотпуска;
- 580 °С – *д* - карбиды внутри и по границам рек в РМ, *е* - карбиды в РМ. Специальные карбиды отмечены стрелками, *ж* - ВМ с карбидами самоотпуска, *з* - темнопольное изображение карбидов в рефлексе (211)  $Fe_3C$ .

Образование специальных карбидов снижает влияние разупрочненных областей ферритно-карбидной смеси и приводит к общему повышению прочностных свойств стали без существенного влияния на пластичность. Структурные изменения приводят к смене механизма разрушения, способствуют увеличению энергоёмкости этого процесса и повышают хладостойкость стали.

Были проведены триботехнические испытания образцов высокопрочной среднеуглеродистой среднелегированной стали в условиях проточной воды на стенде пяточного трения. Максимальный износ образцов наблюдается после отпуска при температуре 520°С, минимальный – после отпуска при температурах 560-580°С.

Таким образом, проведенные исследования показали, что отпуск среднеуглеродистой среднелегированной стали в интервале температур 560-580 °С после закалки от 870 °С в масло обеспечивает оптимальное сочетание требуемых значений прочностных (предел текучести не менее 1100 МПа, твердость ~ 39 HRC) и пластических свойств (значения относительного равномерного удлинения составляют ~ 5 %, относительного удлинения ~ 14 %). Сочетание выбранной композиции легирования стали с предложенным режимом термической обработки обеспечивает достаточный запас прочности, пластичности, твердости и вязкости, что предполагает хорошую работоспособность материала при эксплуатации в области низких климатических температур в условиях абразивного воздействия.