

УДК 620.171.32

**МОДЕЛИРОВАНИЕ «ЖЕСТКОГО» КАРКАСА И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛИ ВСТЗСП ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

© 2015 М.П. Лебедев, В.В. Макаров, А.М. Иванов, Н.И. Голиков

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск

Поступила в редакцию 08.02.2015

Рассматривается моделирование границ зерен и тела зерна созданием в образце жесткого каркаса сварными швами. Проведено исследование влияния «жесткого» каркаса в виде сварного шва (границы зерен) на деформирование «мягкой» матрицы (тела зерна) поликристаллического материала при низких температурах. Экспериментальная проверка предложенной модели выполнена при изгибе образцов в упругой области деформирования материала в условиях низких температур. Показано, что «жесткий» каркас из границ зерен действительно может создать перенапряженные участки в металлических конструкциях при низких температурах из-за разницы коэффициента теплового расширения границ зерен и тела зерна.

*Ключевые слова:* модель, напряженно-деформированное состояние, сталь, температура, сварной шов, зерно, каркас, деформация, напряжение, тепловое расширение.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

Для Крайнего Севера изучение и необходимость решения проблемы хладноломкости – склонности металлических материалов к появлению хрупкости при понижении температуры, как известно, до сих пор актуально. Это связано с возможностью наступления катастрофических разрушений металлических конструкций и различной техники, эксплуатируемых при низких температурах до 223-213 К, в том числе газо- и нефтепроводов, мостов, резервуаров, нефтехранилищ, горнодобывающей, военной техники и др. Особую актуальность проблема хладноломкости приобретает в связи с освоением арктических и антарктических районов. Хладноломкость металлических материалов зависит от внешних, внутренних металлургических, конструктивных и технологических факторов. Создание хладостойкой техники должно быть основано на разработке и знании поведения материалов при низких температурах, эффективных методах оценки работоспособности и долговечности материалов, научно обоснованных рекомендациях по выбору и созданию новых материалов. Механические свойства и работоспособность сталей, применяемых в условиях низких температур, зависят от многих факторов: типа кристаллической решетки,

размера зерна и состояния его границ, содержания легирующих элементов и примесей и т.д.

Разрушение стальных конструкций в условиях низких температур по причине хладноломкости металла является одним из основных явлений [1]. Наряду с кристаллической структурой, скоростью деформации, напряженным состоянием, физической и химической чистотой материала, определяющими вид разрушения, также действующим фактором является температура [2]. Как известно, существует ряд подходов к объяснению низкотемпературной хрупкости конструкционных сталей. Как было отмечено в работах [3-5] одной из причин хладноломкости может быть различие в теплофизических характеристиках структурных составляющих (зерно и граница зерен) сплава. Ранее в [6] было показано, что одной из причин хладноломкости конструкционных сталей, содержащих примесные включения, является образование перенапряженных областей вблизи включений из-за различия коэффициента теплового расширения между ними и основным металлом. Также в [7] описана простая модель «жесткого» каркаса и «мягкого» металла к описанию физической природы процесса хладноломкости конструкционных сталей с учетом того, что коэффициент теплового расширения карбидов на порядок меньше, чем основного металла (матрицы). При изучении природы хладноломкости определенную роль играет моделирование структурного и деформированного состояния металлического материала. Поскольку при низких температурах межзеренные границы у большинства металлических материалов обычно прочнее тела зерна и разрушение имеет транскристаллитный характер, то моделирование «жесткого» каркаса

*Лебедев Михаил Петрович, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор.  
E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru*  
*Макаров Владимир Васильевич, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер  
Иванов Афанасий Михайлович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru*  
*Голиков Николай Иннокентьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.  
E-mail: golikov@iptpn.ysn.ru*

(границы зерна) и исследование его влияния на напряженно-деформированное состояние модельных образцов может дать дополнительную информацию в объяснении природы хладноломкости.

Целью работы является исследование вклада границ зерен в деформирование конструкционного поликристаллического материала при низких температурах на основе моделирования «жесткого» каркаса и «мягкой» матрицы.

## 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе исследованы образцы из малоуглеродистой стали ВСт3сп (0,17 % С, 0,2 % Si, 0,54 % Mn, 0,14 % Cr, 0,14 % Ni и 0,25 % Cu, остальное Fe).

Для исследования и моделирования влияния «жесткого» каркаса на «мягкую» матрицу (тела зерна) были изготовлены образцы следующим образом. Из листовой стали ВСт3сп толщиной 2 мм вырезали квадраты со сторонами 20×20 мм. Затем эти квадраты соединялись между собой путем сварки высокопрочными электродами (Япония). При этом сварной шов в первом приближении можно рассматривать как границы зерен («жесткий» каркас), а квадраты листового металла как тело зерна, т.е. «мягкая» матрица. Для минимизации влияния высокотемпературного шва на структуру и механические свойства основного металла нами использовались электроды Ø 2 мм.

Вид образцов с искусственным «жестким» каркасом приведен на рис. 1.

Второй вид образцов изготовлен путем наплавки сварным швом «жесткого» каркаса на листовую образец без вырезания на квадраты. Вид образцов с искусственным «жестким» каркасом в виде наплавки сварным швом приведен на рис. 2.

Методика создания напряженного состояния и определения напряжений в исследуемом образце описана в [5]. Для нагружения использовалось специальное устройство, реализующее изгиб образца в упругой области деформирования. Напряжения I рода в образце определяли с использованием портативного рентгеновского определителя напряжений «ПРОН» отечественной разработки.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Созданный искусственный «жесткий» каркас из сварного шва отличается от основного металла, как по структуре, так и по механическим свойствам. В этом случае сварной шов получается более прочным и жестким. Механические свойства сварного шва и основного металла для исследованных образцов приведены в таблице 1.

Из данных табл. 1 и исследования структуры [8] видно, что сварной шов и металл квадратных участков отличаются. Из этого можно сделать вывод о том, что роль дополнительных границ зерен играют сварные швы, а телу зерна соответствует тело квадрата листового металла.

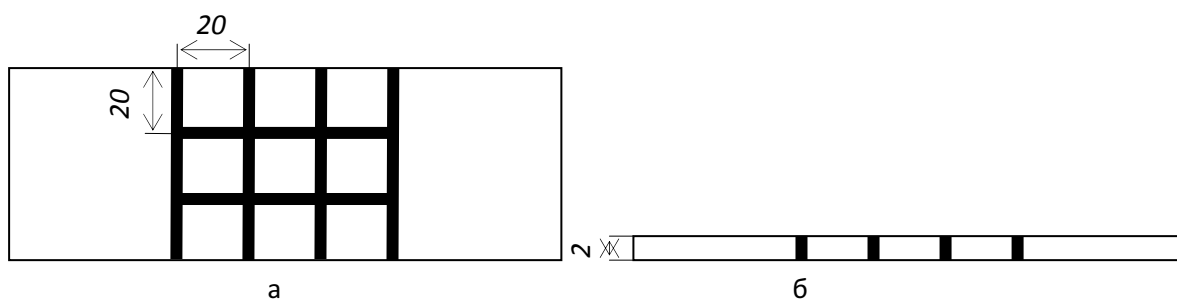


Рис. 1. Образец с искусственным «жестким» каркасом (со сваренными квадратами): а – вид сверху; б – вид сбоку

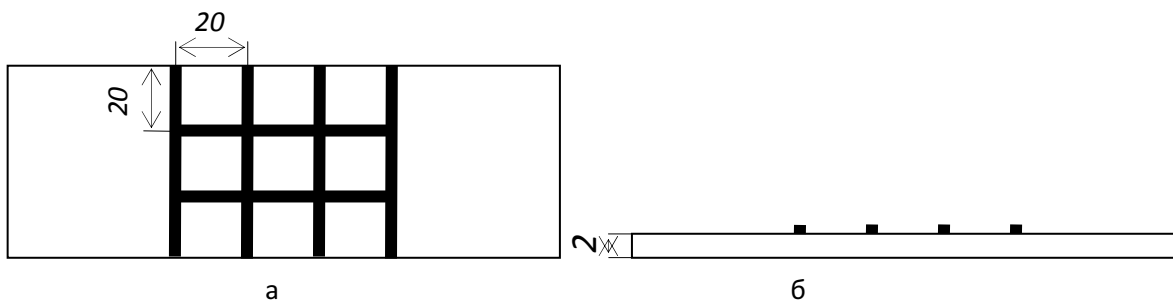


Рис. 2. Образец с искусственным «жестким» каркасом в виде наплавки: а – вид сверху; б – вид сбоку

**Таблица 1.** Механические свойства основного металла, металла сварного шва и напряжения I рода в основном металле в образцах различного типа из стали ВСт3сп

№	Материал	Механические свойства		
		$\sigma_t$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	
1	Основной металл	315	450	
2	Металл шва	420	540	
	Тип образца	Напряжение I рода, МПа		
		293 К	253 К	233 К
3	Образец без сварки	193,8	215,6	226,8
4	Образец с наплавкой сваркой	257,4	281,1	292,8
5	Образец со сваркой насквозь	270	361,2	401,2

Такое моделирование границ зерен и тела зерна осуществлено с тем, чтобы показать действие «жесткого» каркаса на деформирование «мягкой» матрицы (тела зерна) в ходе сжатия поликристаллического вещества при низких температурах. При этом, если будет выявлено в ходе исследования напряженно-деформированного состояния исследованных образцов дополнительный вклад от искусственного «жесткого» каркаса в виде сварных швов, отличающихся по свойствам от основного металла, то можно косвенно сделать вывод о вкладе границ зерен («жесткого» каркаса) в дополнительное деформирование конструкционного поликристаллического материала при низких температурах.

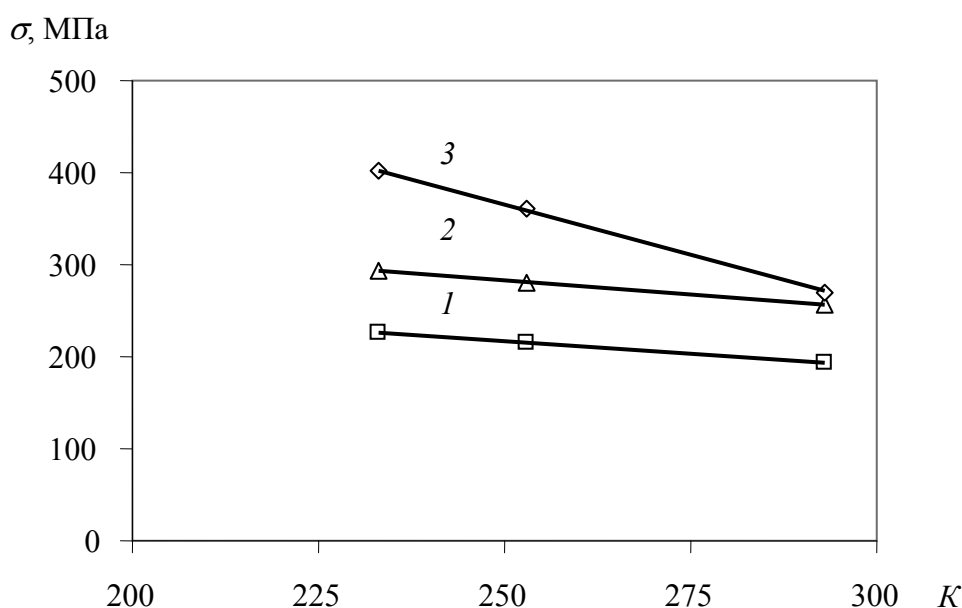
Из данных измерений упругих напряжений<sup>1</sup> при понижении температуры (рис. 3) видно, что с понижением температуры увеличиваются упругие растягивающие напряжения, как у исходных образцов, так и у образцов со сварными

<sup>1</sup>Измерения напряжений с помощью прибора «ПРОН» выполнены О.П. Тихоновым.

наплавками и со сваренными насквозь квадратами. Притом у образцов с наплавками характер низкотемпературного увеличения упругих растягивающих напряжений примерно такой же, как у исходного образца без наплавки. То есть сварные швы в виде наплавки практически не влияют на характер увеличения низкотемпературных упругих напряжений, так как наплавки поверхностные и ограничивающих действий как «жесткая» решетка они не оказывают. Изменения упругих растягивающих напряжений у образцов с проваренными насквозь сварными швами при понижении температуры показывают, что в этом случае скорость увеличения этих напряжений повышается и в рассмотренном интервале температур разница в значениях упругих растягивающих напряжений достигает 25 %.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, данные, полученные из испытаний образцов с моделированным «жестким»



**Рис. 3.** Зависимость напряжений I рода от температуры при действии растягивающей нагрузки на образцах из стали ВСт3сп: 1 – исходный образец; 2 – образец с наплавками в виде решетки; 3 – образец с проваренными насквозь квадратами в виде решетки.

каркасом, показывают, что «жесткий» каркас из границ зерен действительно может создать перенапряженные участки в металлических конструкциях при низких температурах из-за разницы коэффициента теплового расширения границ зерен и тела зерна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении / Р. С. Григорьев, В. П. Ларионов, Ю. С. Уржумцев. Новосибирск: Наука, 1987. 253 с.
2. Вигли Д. А. Механические свойства материалов при низких температурах. М.: Мир, 1974. 274 с.
3. Владимиров В. И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

4. Финкель Р. М. Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия, 1977. 360 с.
5. Разрушение. Том 6. Разрушение металлов / [Пер. с англ. под ред. Г. М. Либовица]. М.: Металлургия, 1976. 496 с.
6. Об одном из механизмов хладноломкости / П.П. Петров, В.В. Макаров, Н.И. Голиков, Н.Н. Терентьев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Том 65. № 6. С. 40-42.
7. Макаров В.В., Петров П.П. Об одной модели хладноломкости стали // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2000. Том 66. № 9. С. 65-66.
8. Microstructure and Strength of Welded Joints of Steel after Equal-Channel Angular Pressing / A.M. Ivanov, E.P. Soshnikova, A.A. Argunova, D.V. Gunderov, N.D. Petrova // Materials Science Forum. Switzerland, Trans Tech Publications Ltd. 2011. Vols. 667-669. Pp. 921-924.

#### MODELING “HARD” FRAME AND STRESS-STRAIN STATE STEEL VST3SP AT LOW TEMPERATURES

© 2015 M.P. Lebedev, V.V. Makarov, A.M. Ivanov, N.I. Golikov

Institute of Physical and Technical Problems of the North named after V.P. Iarionov,  
Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Yakutsk

We consider the modeling of grain boundaries and of a body by creation in the sample hard frame by welds. Research of influence of the “rigid” frame as a welded seam (grain boundaries) on the deformation of the “soft” matrices (grain body) of the polycrystalline material at low temperatures is carried out. Experimental verification of the proposed model is made in bending of specimens in the elastic region of deformation of the material at low temperatures. It is shown that the “hard” frame of grain boundaries can really create overstressed areas in metal structures at low temperatures due to the difference of thermal expansion coefficient of the grain boundaries and grain body.

*Keywords:* model, the stress-strain state, steel, temperature, weld, grain, frame, deformation, stress, thermal expansion.

---

Mikhael Lebedev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director. E-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru

Vladimir Makarov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Engineer

Afanasiy Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher. E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ysn.ru

Nikolay Golikov, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher. E-mail: golikov@iptpn.ysn.ru