



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И АНАЛИЗ ПРИЧИН УХУДШЕНИЯ СВАРИВАЕМОСТИ И ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

**В. В. ДЕРЛОМЕНКО**, инж., академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **В. С. САВЧЕНКО**, д-р техн. наук, **Н. О. ЧЕРВЯКОВ**, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены критерии оценки склонности к образованию горячих и холодных трещин в различных методах определения технологической прочности. С использованием метода Varestraint Test оценена зависимость склонности материала к трещинообразованию от его деградации. Показано, что во всех случаях причинами образования трещин является деградация материала при определенных температурных условиях и напряженно-деформационном состоянии.

*Ключевые слова:* свариваемость, деградация, термическое напряжение, горячие трещины, холодные трещины, технологическая прочность, методы испытаний, температурный интервал хрупкости

Неоднородное температурное циклическое воздействие «нагрев↔охлаждение» приводит к возникновению термических напряжений в сварном соединении. Наличие такого состояния, наряду с возможными структурными изменениями в материале, локальными деформационными процессами, остаточными напряжениями, инициирует значительное ухудшение свойств материала соединения, т. е. происходит его деградация. Различные технологии сварки могут вызывать различную деградацию [1], уровень которой согласно данным работ [2, 3] может служить критерием оценки свариваемости. Очевидно, что достижение материалом соединения уровня деградации выше допустимого приводит к необратимым изменениям свойств материала — появлению трещин и разрушению соединения, либо к проявлению недопустимых служебных характеристик.

За последние годы разными исследователями разработаны методы испытаний на технологическую прочность, которые позволяют оценить склонность к образованию холодных и горячих трещин отдельных участков или сопротивляемость к образованию трещин всего сварного соединения [4–12]. Эти методы создают предельное напряженно-деформированное состояние в шве и зоне соединения, при котором проявляются эффекты деградации металла. Технологическая прочность учитывает лишь материал и технологию, т. е. рассматривает только возможность образования соединения без учета фактора соответствия полученных свойств заданным условиям эксплуатации. Учет последнего фактора является необходимым при оценке свариваемости [1], однако в данной статье он не рассматривается.

Рассмотрим некоторые методы оценки технологической прочности в процессе кристаллизации (горячие трещины), а также их критерии.

Технологические пробы разработаны с целью моделирования условий выполнения реальных сварных конструкций, в частности, многослойных швов при сварке и наплавке и кольцевых при сварке или вварке труб. Отсутствие дефектов типа трещин на технологических пробах свидетельствовало о хорошей свариваемости металла, что давало возможность переходить к сварке реальных изделий и мотивировать правильность выбранных технологий сварки и сварочных материалов.

Качественные технологические пробы оценки склонности к образованию горячих трещин следующие: проба «круглый вварыш» [4], критерий — наличие/отсутствие макро- или микротрещин; проба с кольцевым многослойным швом для аустенитных сталей BWRA (Британской исследовательской ассоциации по сварке) [5], критерий — наличие/отсутствие трещин в многопроходном шве и металле ЗТВ; проба Килгрена–Лаци [5] — наличие/отсутствие трещин в многопроходном шве; Н-образная проба [5] — наличие/отсутствие макро- или микротрещины в третьем контрольном шве; тавровая проба [6] — наличие/отсутствие трещины в контрольном шве.

«Полуколичественные» [4] технологические пробы оценки склонности к образованию горячих трещин следующие: проба Каутца [5] — склонность к образованию горячих трещин считается умеренной, если общая длина трещин в четвертом контрольном шве не превышает 25 мм; проба Хаксли [5] — в зависимости от конкретного случая критерием может служить средняя длина трещины в шве или отношение средней длины трещины к длине секции; крестовидная тонколистовая проба [5] — отношение длины швов с трещинами к общей длине швов; проба Браун–Бовери [5] —



количество и протяженность трещин в сварных швах; Segmented-Groove circular restraint specimen [7] — отношение суммарной длины трещины к длине шва; проба со шлицами Теккен [5], Houldcroft cracking test, Circular patch specimen и U. S. Navy circular-patch specimen [7] — процентное отношение длины трещины к длине всего шва.

С помощью качественных и полуколичественных технологических проб исследуются сплавы и сварочные материалы, оптимизируются условия и технологические режимы сварки. Критериями оценки являются наличие и отсутствие горячих трещин и их количество, абсолютная или относительная длина трещин. Данный вид проб характеризует свойства сплавов с точки зрения технологической прочности и не позволяет выделить составляющие: прочность и пластичность в зоне трещин, форму и температурные границы провала пластичности (ТИХ1, ТИХ2), т. е. фиксируется сам факт наличия трещин в исследуемом металле при заданных технологических параметрах, при этом не рассматриваются температурные и деформационные условия возникновения трещин.

Количественные технологические пробы оценки склонности к образованию горячих трещин следующие: проба Боленрата [5] — регулируя расстояние между зажимами, регулируют деформацию шва, при которой возникают трещины; составная листовая проба МВТУ [5], критерий — минимальная ширина пластины, при которой не образуется трещина; проба МВТУ для трубных образцов [5] — длина участка от края трубы до вставки, при которой отсутствуют трещины; проба ИМЕТ для тонколистового материала [5] — максимальная длина шва до надреза, при которой отсутствуют трещины; проба ЛТП МВТУ [4] — ширина пластины, при которой нет трещин; проба Лихайского университета [7] — максимальная глубина прорезей, при которой нет трещин; проба с ключевидной прорезью Морской исследовательской лаборатории США [7] — расстояние от отверстия до сварочной ванны в момент появления трещины или длина трещины. В свою очередь количественные технологические пробы используют в качестве критерия оценки склонности к образованию горячих трещин конструктивные параметры соединения, обуславливающие его жесткость, которые являются сравнительным критерием, пропорциональным темпу деформации шва [4].

Методы количественного определения сопротивления металла образованию горячих трещин с принудительным деформированием сварного соединения: проба ЛТП-1-6 [8], методы Ота и Фредрикса, ИМЕТ-2, Бланше и Мюрекс [5] — критическая скорость деформации  $V_{кр}$ , приводящая к образованию трещины; МВТУ [5] — критическая угловая скорость деформации  $\omega$ , приво-

дящая к образованию трещины; PVR [9], Varesstraint, Transvaresstraint [10], Strain-to-fracture [11] — критическая деформация  $\epsilon_{кр}$ , приводящая к образованию трещины.

Исходя из приведенных критериев можно предположить, что в технологических пробах, как и в количественных методах определения сопротивления металла образованию горячих трещин с принудительным деформированием, главными условиями образования трещин является достижение критического значения  $\epsilon_{кр}$  в определенном температурном интервале в участке образования трещины, что, по мнению авторов [2, 3], связано с деградацией металла.

По такой же схеме рассмотрим методы оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин при сварке: крестовая проба [4] — наличие/отсутствие трещин; Теккен [4] — критическая скорость охлаждения, при которой появляется трещина; проба с круговой наплавкой, Кренфильд и ЦНИИТМаш [4] — критическое количество усадочных валиков, вызывающих трещину; проба Лихайского университета [4] — максимальная глубина прорезей, при которой нет трещин; пробы ВМЭИ, ЦНИИТС и «круглый вварыш» [4] — критический геометрический размер образца, обуславливающий его жесткость; пробы ЛТП МВТУ и ИМЕТ 4 [12] — соотношение критического значения напряжения ко времени до разрушения в водородсодержащей среде; TRC [12] — критическое значение напряжения, ниже которого отсутствует трещина при перпендикулярной или вдоль шва нагрузке; инкубационный период зарождения трещины.

Как видно из приведенных некоторых методов оценки сопротивляемости сталей образованию холодных трещин, при сварке критерии оценки могут быть аналогичными критериям оценки горячих трещин:

качественный (наличие/отсутствие трещин (да/нет));

полуколичественный (относительная длина трещин, критическая скорость охлаждения, критическая начальная температура, критическое количество усадочных валиков шва);

количественный (критический геометрический размер образца, обуславливающий его жесткость; минимальное напряжение, при котором образуются трещины; комплекс условий сварки, при которых не образуется трещина; критическая скорость и значение деформации, при котором образуется трещина).

Как правило, испытания на холодные трещины относятся к методам оценки замедленного разрушения. Это означает, что благодаря воздействию напряжения внешней среды и длительному процессу диффузии водорода в зоны с повышенным напряжением, время до образования трещин

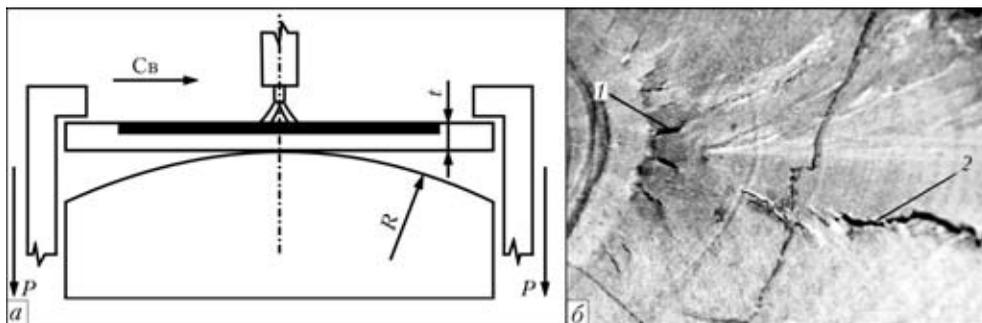


Рис. 1. Схема динамической деформации при использовании метода Vareststraint Test (а) и характерные трещины при сварке сплавов с высоким содержанием Ni (б): 1 — температурный интервал хрупкости (ТИХ1); 2 — температурный интервал провала пластичности (ТИХ2)

может составлять от нескольких минут до нескольких суток или более. Главной причиной образования трещин, инициированных водородом, предположительно является достижение предельной локальной концентрации водорода вследствие наличия деформаций и напряжений критического уровня в участках сварного соединения при данной температуре, т. е. в условиях локальной дегградации металла, обуславливающей его охрупчивание.

Рассмотрим дегградационные процессы подробнее на примере высоколегированных сталей и жаропрочных никелевых сплавов с точки зрения их технологической прочности при дуговой сварке плавлением, исходя из критерия образования горячих трещин в сварном соединении.

На рис. 1 приведена схема метода Vareststraint Test и области возникновения трещин при регулируемом изгибе сварного соединения в процессе сварки.

Процедура проведения опыта предусматривает проплавление пластины без присадки вольфрамовым электродом. Начальная часть шва выполняется без деформации. В момент нахождения сварочной ванны над верхней точкой оправки включается пневмопривод, перемещающий прижимы вниз. При этом процесс сварки не прекращается, а продолжается еще некоторое время. В результате металл жидкой ванны и всех зон как в шве, так и в металле ЗТВ подвергается заданной деформации, инициируя образование горячих тре-

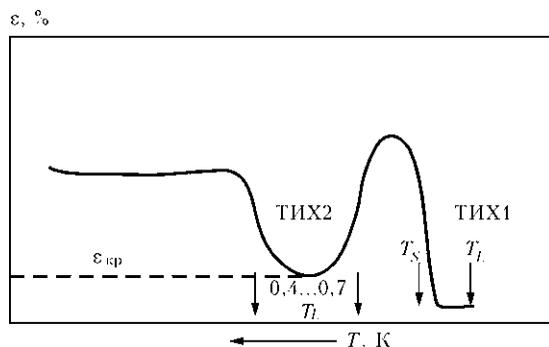


Рис. 2. Высокотемпературная пластичность металла с областями, содержащими характерные типы горячих трещин

щин. Деформацию  $\epsilon$  наружных слоев образца при изгибе рассчитывают по формуле  $\epsilon = \frac{t}{2R} 100\%$ , где  $t$  — толщина свариваемой пластины;  $R$  — радиус оправки, на которой выполняется гибка [13].

Трещины, образующиеся при высоких температурах (рис. 2), близких к температуре затвердевания, обуславливают так называемый высокотемпературный интервал хрупкости ТИХ1 (BTR). Он располагается от температуры ликвидуса  $T_L$  до несколько ниже температуры солидуса (примерно на 100...150 °С). Низкотемпературный интервал хрупкости ТИХ2 (DTR) находится в температурном интервале  $(0,4...0,7)T_L$ . Критическое значение деформации  $\epsilon_{кр}$ , выше которой возникают трещины, для разных хромоникелевых сталей составляет примерно 0,1...1,5 %. В иностранной литературе данные интервалы хрупкости называются Brittle Temperature Range (BTR) и Ductility dip Temperature Range (DTR) соответственно [13].

Экспериментальные данные по оценке температурно-деформационных условий возникновения трещин для ряда сварных соединений нержавеющей сталей и для жаропрочного никелевого сплава с поли- и монокристаллической структурой приведены на рис. 3, 4. Так, сталь типа AISI 304 (аналог отечественной стали 12X18H9) не-

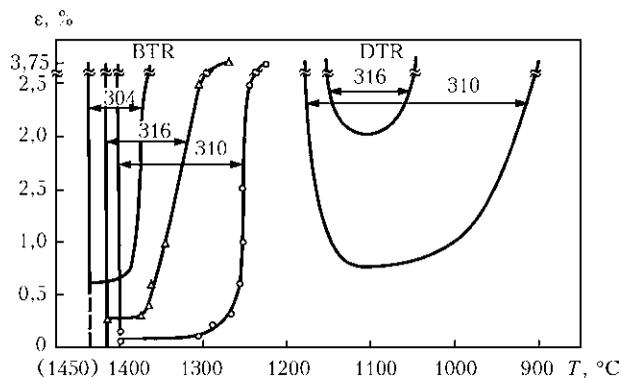


Рис. 3. Температурные интервалы хрупкости сварных швов аустенитных нержавеющей сталей типа 304, 310, 316 и определенные по методу Vareststraint Test [4]

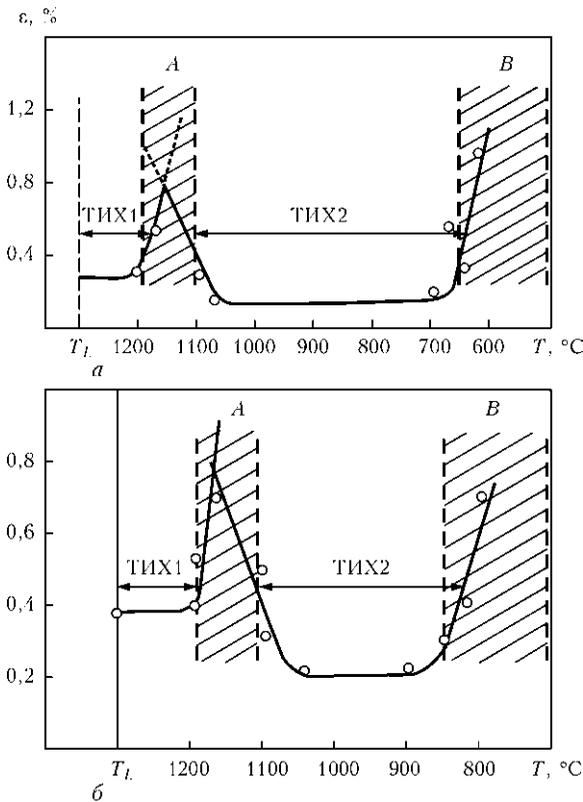


Рис. 4. Температурные интервалы хрупкости сварных швов поликристаллического сплава с  $\gamma' = 50\%$  (а) и монокристаллического сплава с  $\gamma' = 60\%$  (б)

чувствительна к образованию трещин (рис. 3); сталь AISI 316 (аналог стали 10X17H13M2) имеет умеренную чувствительность; сталь AISI 310 (аналог стали 20X23H18) проявляет повышенную склонность к образованию трещин [13, 14]. В свою очередь поли- и монокристаллические никелевые сплавы с содержанием  $\gamma' = 50$  и  $60\%$  соответственно отличаются весьма низкой устойчивостью против трещин.

Следует обратить внимание на два принципиальных момента в проявлении чувствительности к образованию трещин.

Во-первых, предельный уровень деформации  $\epsilon_{кр}$ , выше которого при определенных температурах в швах и металле ЗТВ возникают макротрещины. В нашем случае данная характеристика является одним из критериев свариваемости —

по оценке склонности к образованию трещин. Значения  $\epsilon_{кр}$  в интервалах хрупкости ТИХ1 и ТИХ2 показаны в таблице.

Чем ниже значение  $\epsilon_{кр}$ , тем больше склонность материала к горячим трещинам, или меньше запас сопротивляемости трещинообразованию.

Во-вторых, характер изменения кривой зависимости  $\epsilon_{кр} = f(T)$ . Как правило, температурная кривая пластичности имеет номинальные значения в зонах между ТИХ2 и ТИХ1, а также от конца ТИХ2 до комнатной температуры (рис. 4, а, б). Зоны номинальной пластичности заштрихованы и обозначены А и В. Отметим, что в обоих температурных интервалах хрупкости ТИХ1 и ТИХ2, при которых сопротивляемость шва образованию горячих трещин значительно снижается, происходит изменение комплекса механических свойств в сторону их ухудшения, т. е. наступает деградация металла. Об этом свидетельствует ход кривой  $\epsilon = f(T)$ , углы ее наклона и ширина зоны провала пластичности. Технология сварки в этих условиях может ускорить деградацию металла по абсолютным значениям критериальных свойств, характеризующих свариваемость стали или сплава данного химического состава, метода производства. Таким образом, от влияния технологии сварки на соответствующую деградацию физических свойств металла — склонность к образованию трещин, зависит численный показатель свариваемости и его абсолютное значение. В данном случае — это изменение деформационной способности по отношению к исходному или стабилизированному состоянию данного материала.

Возможное объяснение причин образования трещин можно сделать, исходя из сравнительного анализа напряженно-деформированного состояния в сварных соединениях, склонного к трещинам высоконикелевого сплава типа ЖС-26 и аустенитной нержавеющей стали 03X20H16AГ6, стойкой против трещин. При этом исходили из оценки свариваемости по степени деградации. С использованием экспериментальных данных и расчетных методов определяли текущие значения значений продольных напряжений и пластических деформаций в зависимости от температуры

**Характеристики температурных интервалов хрупкости и критических напряжений для образования трещин при испытаниях по методу Trans Varestraint Test**

Сталь или марка сплава	Высокотемпературный интервал хрупкости ТИХ1, °С	Низкотемпературный интервал хрупкости ТИХ2, °С	$\epsilon_{кр}, \%$	
			ТИХ1	ТИХ2
304	1450...1420	—	0,75	—
316	1415...1375	1150...1050	0,25	2,00
310	1400...1300	1175...1000	0,10	0,75
На основе Ni, $\gamma' = 50\%$ , поликристалл	TL-1190	1110...670	0,28	0,15
На основе Ni, $\gamma' = 60\%$ , монокристалл	TL-1190	1105...790	0,38	0,20

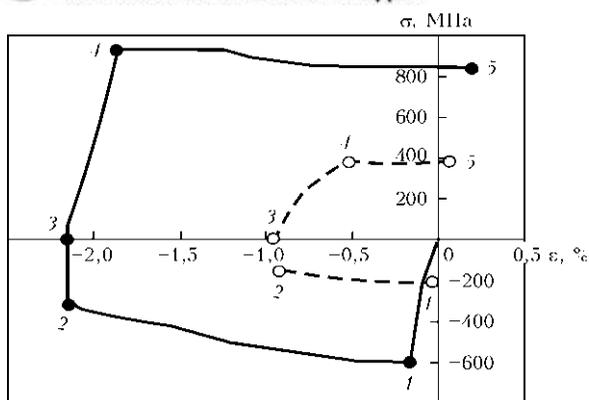


Рис. 5. Расчетное развитие напряжений и деформаций при сварке никелевого сплава и аустенитной стали: точки 0–2 — нагрев, 2–5 — охлаждение; сплошная кривая — никелевый сплав ЖС-26; штриховая — сталь X20H16AG6

в точке на расстоянии 0,5 мм от линии сплавления как на ветви нагрева до  $T_{max}$ , так и охлаждения до 20 °С. Из представленных на рис. 5 данных расчетов следует, что в никелевом сплаве уровень растягивающих продольных напряжений достигает около 920 МПа, что соответствует пределу текучести в температурном интервале провала пластичности, а значение пластической деформации около 1,75 %, что почти на порядок выше  $\epsilon'_{кр} \approx 0,15$  %. Таким образом, созданы условия для интенсивной деградации металла, что и сказалось на появлении трещин в зоне ТИХ2. В аустенитной стали уровень напряжений (рис. 5) также близок к пределу текучести и составил около 390 МПа, а пластической деформации около 0,5 % при  $\epsilon'_{кр}$  примерно 4 %. Поскольку деградация металла не достигает уровня, вызывающего трещины, сталь относится к хорошосвариваемой [15].

Таким образом, подтверждается, что технологическая прочность, а соответственно и свариваемость коррелируют и оцениваются степенью деградации материала. В данном случае деформацией  $\epsilon$ , при достижении которой критического значения возникают трещины в сварном соединении при определенных температурах, характерных для сварочного цикла.

## Выводы

1. Приведенные методы определения технологической прочности имеют различные критерии, исследуют широкий спектр соединяемых материалов и технологий сварки. Общепринятой оценкой технологической прочности (свариваемости) является ухудшение трещиностойкости, склонности

к замедленному разрушению и охрупчиванию металла до образования несплошностей (микро- и макротрещин), что указывает на протекание процессов негативного изменения свойств материала.

2. Всякое ухудшение свойств, протекающее во времени при определенных условиях термосилового и дополнительного воздействия на металл, характерных для сварки, способствует достижению металлом предельного состояния, которое ведет к образованию несплошностей межкристаллитного или транскристаллитного характера к деградации.

3. Деградацию свойств материала соединения следует рассматривать как универсальный критерий оценки технологической прочности и соответственно свариваемости.

1. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Анализ современных представлений о свариваемости // Автомат. сварка. — 2005. — № 1. — С. 9–13.
2. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Критерии свариваемости материалов // Там же. — 2006. — № 1. — С. 31–34.
3. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Зварюваність та зміни фізико-механічних властивостей зварних з'єднань // Фіз.-хім. механіка матеріалів. — 2006. — №2. — С. 89–93.
4. Сварка в машиностроении: Справочник. В 4 т. / Редкол.: Г. А. Николаев и др. — Т.3 / Под ред. Винокурова. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.
5. Горячие трещины при сварке жаропрочных сплавов / М. Х. Шоршоров, А. А. Ерохин, Т. А. Чернышова и др. — М.: Машиностроение, 1973. — 224 с.
6. Сварка и свариваемые материалы: В 3-х т. Т. 1. Свариваемость материалов: Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Металлургия, 1991. — 528 с.
7. Stout R. D., Dorville W. D. Weldability of steels. — New-York: Welding research council, 1978. — 392 p.
8. Гривняк И. Свариваемость сталей / Под ред. Э. Л. Макарова. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
9. Wilken K. Investigation to compare hot cracking tests externally loaded specimen. — [1998]. — (Intern. Inst. of Welding; Doc. IX-1923–98).
10. Savage W. F., Zuntic C. D. The Vareststraint Test // Welding J. — 1965. — 44, № 10. — P. 433–442.
11. Nissley N. E., Lippold J. C. Development of the strain-to-fracture test for evaluating ductility-dip cracking in austenitic alloys // Ibid. — 2003. — 82, № 12. — 355s–364s.
12. Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И. Испытания металлов на свариваемость. — М.: Металлургия, 1972. — 240 с.
13. Kato K., Machora Y., Ohmosy Y. Effect of stacking fault precipitation on hot deformation of austenitic stainless steel // Transaction ISIJ. — 1986. — 26, № 2. — P. 159–166
14. К возможному механизму образования трещин в стабильно аустенитных швах вследствие сегрегации кислорода / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Н. О. Червяков, А. В. Звягинцева // Автомат. сварка. — 2010. — № 5. — С. 10–16.
15. Investigation of structure and crack formation in welded joints of single crystal Ni-base alloys / V. S. Savchenko, K. A. Yushchenko, A. V. Zvjagintseva et al. // Welding in the World. — 2007. — 51, № 11/12. — P. 76–81.

The criteria for evaluation of a tendency to hot and cold cracks formation in different methods for determination of technological strength were considered. Dependency of material tendency to crack formation on its degradation was evaluated using Vareststraint-Test. It is shown that in all cases the reason for cracks formation is degradation of material properties under specified temperature conditions and stress-strain state.

Поступила в редакцию 15.10.2009