

ния параметров реологической модели жидкости, демонстрирующей проявление эффекта “отвердевания”.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 12-08-00629.*

#### Список литературы

1. Jeffrey D.J., Acrivos A. The Rheological Properties of Suspensions // *AIChE Journal*. – 1976. – V. 22. № 3. – P. 417 – 432.

2. Reological behavior a concentrated suspension: A solid rocket fuel simulant / Kalyon D.M., Yaras P., Aral B., Yilmazer U. // *Inc. J. Rheol.* – 1993. – V. 37. № 1. – P. 35–53.

3. Lee Y.S., Wagner N.J. Rheological Properties and Small – Angle Neutron Scattering of Shear Thickening, Nanoparticle Dispersion at High Shear Rates // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2006. – V. 45, № 21. – P. 7015 – 7024.

4. Wisniewski A. Nanotechnology for increase of body protection capability. URL: <http://www.witu.mil.pl/www/biuletyn/zeszyty/20080107p7.pdf>. Дата обращения: 21.01.2013.

5. Колодежнов В.Н. Математическое моделирование реологического поведения нелинейно-вязких жидкостей, которые демонстрируют проявление эффекта “отвердевания” // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. – 2012. – № 4. – С. 35-38.

6. Колодежнов В.Н. Математическое моделирование сдвигового поступательного течения жидкости, демонстрирующей проявление эффекта “отвердевания”, в зазоре между коаксиальными цилиндрами // *Известия Юго-Западного государственного университета*. – 2013. – № 5 (50). – С. 211 – 215.

*Получено 27.06.14*

**V.N. Kolodezhnov**, Doctor of Sciences, Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (e-mail: kvn117@mail.ru)

#### MODELING OF FLUID FLOW, DEMONSTRATING THE EFFECT OF “SOLIDIFICATION”, NEAR THE CYLINDER PERFORMS SPACE TRANSLATIONAL MOTION ALONG ITS AXIS

*On the basis of rheological model of a fluid, which demonstrates the effect of “solidification”, the steady-state, shear, progressive flow near the cylinder is considered. The three main schemes of the flow is analyzed. For these schemes the dependence of the velocity of the cylinder from the applied force is obtained.*

**Key words:** rheological model, effect of “solidification”.

УДК 621.791.754.3

УДК 691.714.018.8

**А.В. Беляков**, канд. техн. наук, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный технический университет» (Тверь) (e-mail: abelyakov@mail.ru)

#### ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ХРОМИСТЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

*Изложены результаты исследований напряженно-деформационного состояния хромистых низкоуглеродистых коррозионностойких сталей. Исследован механизм термокинетического превращения и термомодеформационные процессы при охлаждении стали 5CR12HT. Установлено влияние фазового аустенитно-мартенситного превращения на низкий уровень остаточных деформаций при сварке.*

**Ключевые слова:** сварка, хромистая низкоуглеродистая коррозионностойкая сталь, термокинетическое превращение, термомодеформационные процессы, аустенит, мартенсит, остаточные деформации.

\*\*\*

По литературным данным [1, 2, 3] и по данным фирм-производителей (KRUPP (NIROSTA 4003); SANDVIK (5CR12HT); ЦНИИ КМ «ПРОМЕТЕЙ» (01X13MT)) высокохромистые низкоуглеродистые коррозионностойкие стали обладают хорошей свариваемостью. Это

объясняется чрезвычайно малыми значениями остаточных напряжений и деформаций при сварке (относительное удлинение крайне мало), что несвойственно для высоколегированных сталей, но может иметь большое значение при производстве тонколистовых крупногабарит-

ных сварных конструкций (например, в вагоностроении). Однако для грамотного использования этого эффекта необходимо выяснить причины малых значений остаточных деформаций при сварке.

Высокохромистые низкоуглеродистые коррозионностойкие стали в зависимости от фактического содержания Fe и Cr могут относиться к разным структурным классам (см. рис. 1). В частности, при содержании C 0,03...0,08% и Cr 12...14% сталь может относиться к чисто ферритному классу (при C < 0,09% и Cr > 13%) и к ферритно-мартенситному (при средних значениях C и Cr). Это обстоятельство делает сталь нестабильной по свойствам, и даже небольшие отклонения в составе (в пределах марки) резко

изменяют структуру стали от ферритной до мартенситной [1]. Сравнительный химический состав некоторых марок низкоуглеродистых высокохромистых сталей приведен в таблице.

Таким образом, в зависимости от химического состава стали, а именно, содержания C, Cr и Fe аустенитное ( $\gamma \leftrightarrow \alpha$ ) превращение может не происходить, происходить частично либо протекать полностью. То же можно отнести и к мартенситному превращению. На основании вышесказанного можно сделать предположение, что причиной низкого уровня деформаций при сварке высокохромистых низкоуглеродистых коррозионностойких сталей могут быть фазовые превращения (аустенитное, мартенситное).

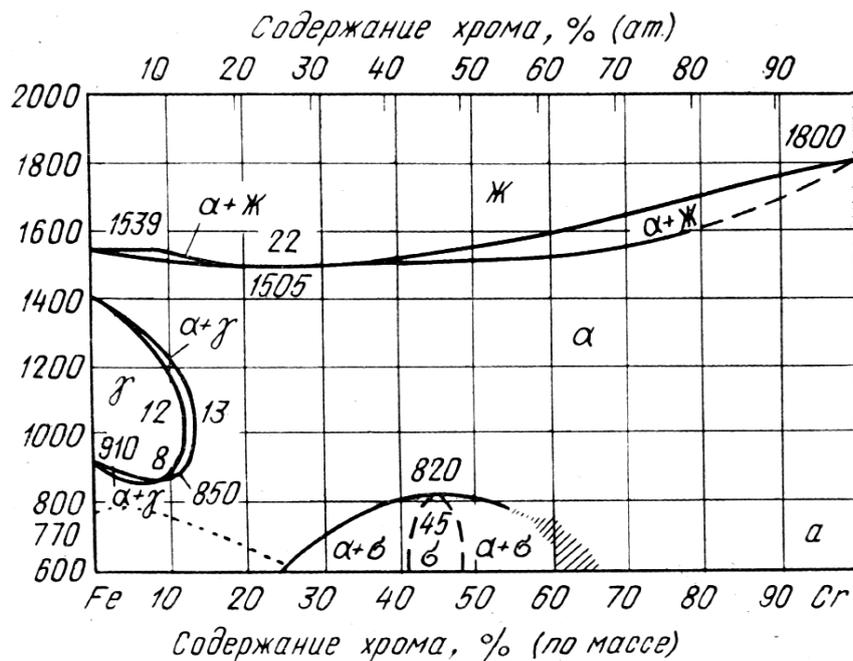


Рис.1. Диаграмма состояния Fe-Cr [2]

Сравнительный химический состав некоторых низкоуглеродистых хромистых коррозионностойких сталей

	C	Si	Mn	Cr	Ni	N	P	S
08X13	0,05	0,35	0,20	13,43	≤0,6	-	≤0,03	≤0,025
	≤0,08	≤0,8	≤0,8					
NIROSTA 4003	≤0,03	≤0,50	0,5-1,5	10,5-12,5	0,3-1,0	≤0,03	≤0,04	≤0,02
Sandvic 5CR12HT	≤0,03	≤0,50	≤1,5	10,5-12,5	≤1,0	≤0,03	≤0,04	≤0,02
	0,05	0,24	1,14	≤13,0	-	-	0,026	0,01

Фазовые превращения сопровождаются изменением объема, внутренние напряжения частично компенсируются и остаточные деформации значительно уменьшаются. При отсутствии фазовых превращений возможно снижение деформаций за счет резкого повышения пластичности в определенном диапазоне температур при мелкой высокодисперсной структуре стали (эффект сверхпластичности).

На основании данного предположения сформулируем цели и задачи исследования.

Цель работы:

Исследовать напряженно-деформационное состояние хромистой низкоуглеродистой коррозионностойкой стали при охлаждении с области высоких температур.

Задачи работы:

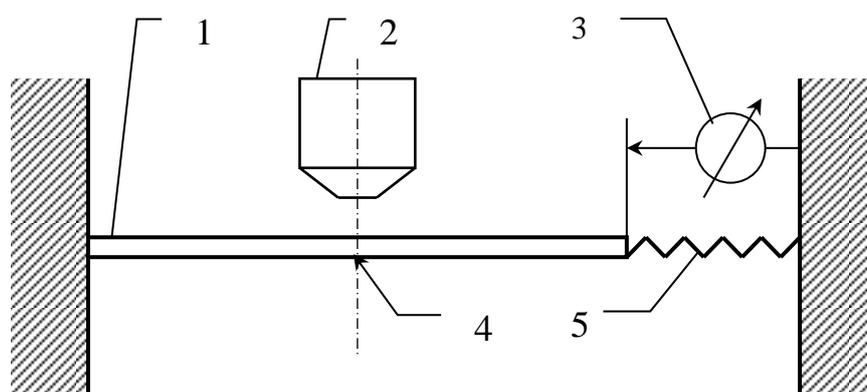
– разработать методику оценки напряженно-деформационного состояния стали при сварке;

– исследовать механизм структурного превращения при охлаждении стали 5CR12HT;

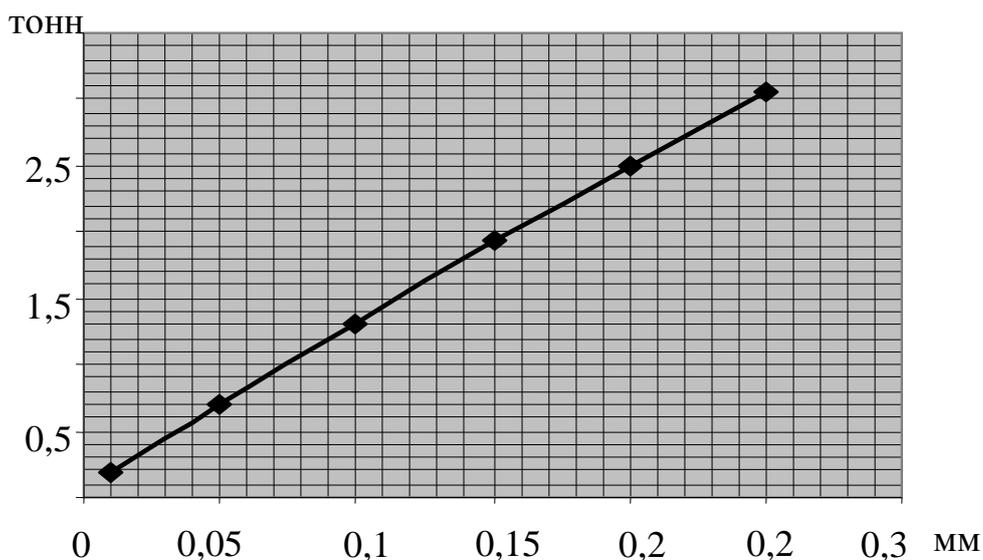
– исследовать термодформационные процессы при охлаждении стали 5CR12HT;

– на основании результатов исследований и металлографического анализа сделать вывод о причине низкого уровня остаточных деформаций.

Для оценки напряженно-деформационного состояния стали при сварке разработана установка, представленная на рис. 2.



а)

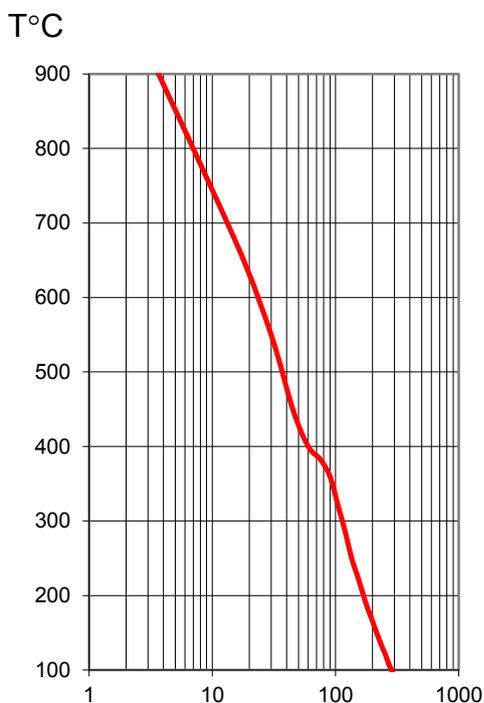
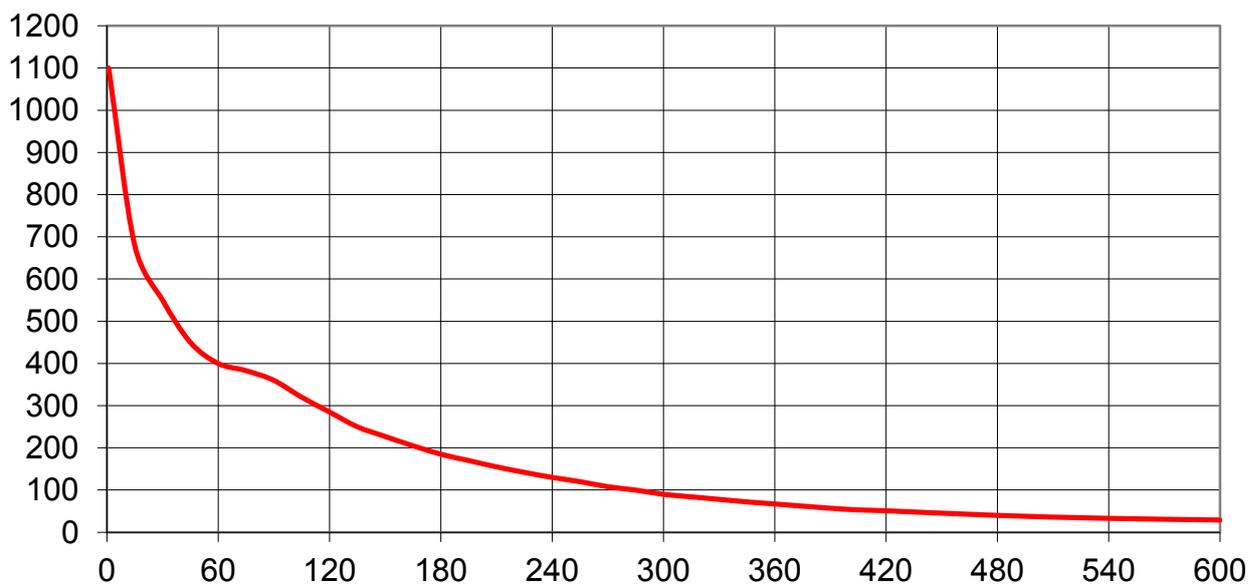


б)

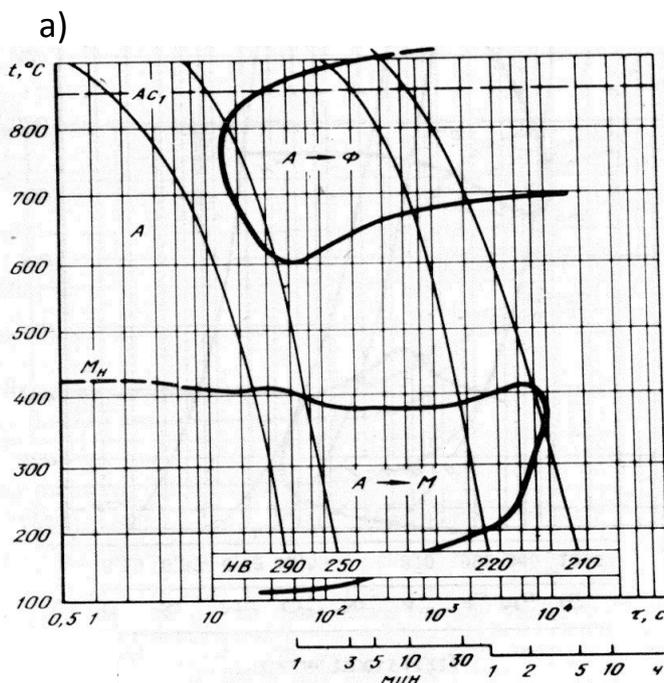
Рис. 2. Описание методики исследования: а – принципиальная схема экспериментальной установки; 1 – образец; 2 – горелка; 3 – индикаторная головка; 4 – термопара; 5 – упругий элемент (динамометрическая пружина); 6 – тарировочный график пружины

Образец, жестко заземленный с одной стороны, с другой прикреплен к упругому элементу. Непосредственно на упругом элементе установлен индикатор часового типа 3 (точность измерения – 0,001 мм), который фиксирует продольные перемещения подвижной пластины. Через упругий элемент возможно предва-

рительное растяжение или сжатие образцов и оценка продольных деформаций при нагреве, охлаждении или при сварке. Используя тарировочный график динамометрической пружины (рис. 3), возможен перевод линейных деформаций в нагрузку.



б)



в)

Рис. 3. Запись термического цикла при охлаждении стали 5CR12HT: а – термический цикл; б - запись термического цикла в логарифмических координатах; в - диаграмма термокинетического превращения стали 5CR12HT

Методика позволяет имитировать условия нагрева при различных способах сварки и осуществлять сварку плавящимся и неплавящимся электродом в атмосфере защитных газов.

Образец закрепляли на установке, после чего производили его предварительное растяжение. Значения предварительного растяжения находились в зоне упругой деформации ( $\sigma < \sigma_{0,2}$ ). Нагрузка составляла  $\approx 1300$  кг для пластины размером 200/80 и  $\approx 250$  кг – для пластины 200/25. После закрепления образец до температур 1100...1300°C. Фиксировали изменения продольной деформации в зависимости от времени и температуры при охлаждении образца. В тех же условиях осуществлялась запись термического цикла.

Анализ записи термического цикла при охлаждении стали (рис. 3 а, б) и наложение его на диаграмму термокинетического превращения (рис. 3 в) показывает, что скорость охлаждения образца при данных условиях выше критической, т.е.  $A \rightarrow \Phi$  превращение не происходит, а начало  $A \rightarrow M$  превращения наблюдается при температуре около 400°C. Следует отметить, что при реальных условиях сварки плавящимся электродом в атмосфере защитных газов скорость охлаждения еще выше и вероятность  $A \rightarrow \Phi$  превращения крайне мала.

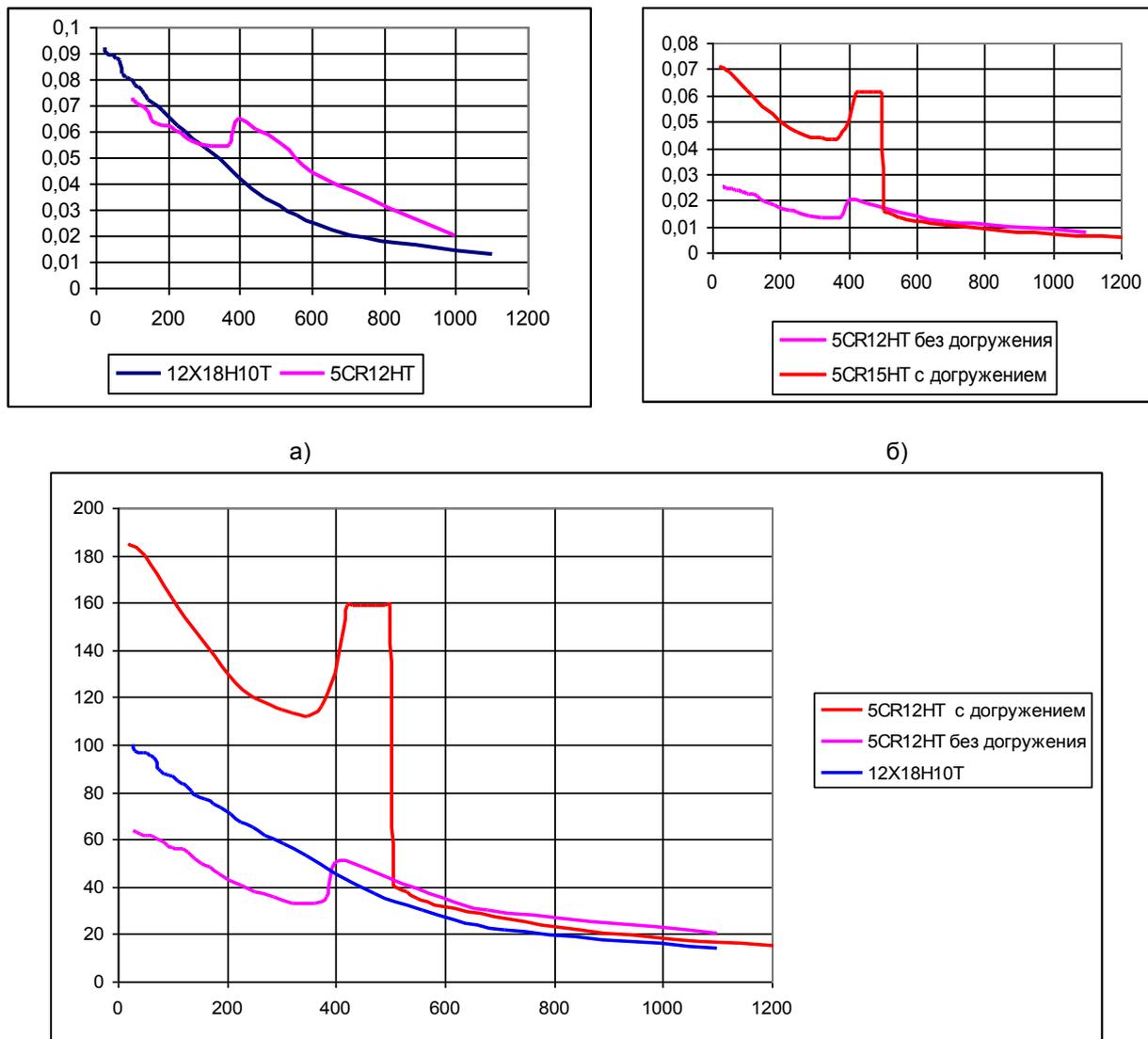
Анализ термомодеформационного состояния стали 5CR12HT при охлаждении подтвердил результаты исследований механизма структурного превращения. В диапазоне температур  $\approx 400...300^\circ\text{C}$  наблюдается заметное снижение линейных деформаций, а затем их постепенный рост. На графике 1 (рис. 4 а) показана зависимость линейных деформаций от температуры при охлаждении сталей 5CR12HT и 12X18H10T.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что низкий уровень остаточных деформаций при сварке высокохромистых низкоуглеродистых коррозионноустойчивых сталей объясняется фазовым  $A \rightarrow M$  превращением (рис. 3 в, 4 а). Однако при проведении экспериментов обнаружился интересный эффект: линейные деформации, уменьшающиеся вследствие фазовых превращений, не должны изменяться при изменении внешней нагрузки (дополнительном догрузении); но при дополнительном догрузении снижение линейных деформаций более значительно, т.е. возможно, что на снижение величины деформации влияют и другие факторы.

Догружение производилось в диапазоне температур 500...400°C (до начала снижения линейных деформаций). Величина догружения в данном диапазоне температур не превышала значений условного предела текучести.

На рис. 4 б изображена зависимость линейных деформаций от температуры при охлаждении стали 5CR12HT без дополнительного догружения и с догружением.

На рис. 4 в изображена зависимость напряжений от температуры при охлаждении стали 5CR12HT и 12X18H10T. На графиках отчетливо видно заметное снижение деформаций и напряжений при дополнительном догрузении. Таким образом, возможно влияние на снижение деформации других факторов: резкого повышения пластичности в диапазоне температур 300...400°C (проявление эффекта сверхпластичности), что требует проведения дополнительных исследований.



в)  
 Рис. 4. Зависимость линейных деформаций и напряжений от температуры при охлаждении стали 5CR12HT и 12X18H10T

**Список литературы**

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. – М.: Металлургия, 1977.  
 2. Лахтин Ю.М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. – М.: Металлургия, 1976.

3. Каховский Н.И. *Сварка высоколегированных сталей*. – Киев: Техника, 1975.  
 4. *Марочник сталей и сплавов* / под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989.

*Получено 27.06.14*

**A.V. Belyakov**, Candidate of Sciences, Tver State Technical University (Tver)  
 (e-mail: abelyakov@mail.ru)

**PECULIARITIES OF WELDING OF LOW-CARBON CORROSION RESISTANT CHROMIUM STEELS**

*Results of investigations of stress-strain state of chromium low-carbon corrosion-resistant steels. The mechanism thermokinetic transformation and thermal-deformation processes in cooling steel 5CR12HT. The influence of phase austenitic-martensitic transformation to a low level of residual deformations during welding.*

**Key words:** welding, low-carbon corrosion resistant chromium steel, thermokinetic transformation, thermal-deformation processes, austenite, martensite, permanent deformation.