

# СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ РАЗНОЙ ПРОЧНОСТИ С УСТАНОВИВШИМИСЯ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

В. А. ДЕГТЯРЕВ

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины.  
01014, г. Киев-14, ул. Тимирязевская, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

В работе предложен сравнительный анализ диаграмм предельных напряжений цикла сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей разной прочности при условии, что они содержат одинаковый уровень установившихся остаточных напряжений. На примере испытаний стыковых соединений сталей СтЗсп, 09Г2С и 14ХМНДФР показано, что сварные соединения с большими механическими свойствами имеют более высокие пределы выносливости во всем исследованном диапазоне изменения предельных установившихся остаточных напряжений. Установлено, что при одинаковом относительном значении среднего напряжения цикла сварные соединения более прочных сталей также имеют более высокие значения предела выносливости, которые увеличиваются более интенсивно с повышением относительных значений среднего напряжения цикла. Библиогр. 10, табл. 2, рис. 5.

*Ключевые слова:* сварное соединение, амплитуда напряжений цикла, среднее напряжение цикла, предел текучести, установившееся остаточное напряжение, предел выносливости, диаграмма предельных напряжений цикла

Исследованиями, проведенными в работе [1], установлено, что диаграммы предельных напряжений цикла (ДПНЦ) стыковых сварных соединений низкоуглеродистых и низколегированных сталей разной прочности с высокими остаточными напряжениями (ОН) растяжения в области ограниченной долговечности (до количества циклов нагружения  $N = 5 \cdot 10^5$ ), имея одинаковый предел выносливости при симметричном цикле напряжений, с увеличением коэффициента асимметрии цикла  $R_\sigma$  расходятся, показывая преимущество сталей большей прочности. При  $N > 2 \cdot 10^6$ , начиная с симметричного цикла и до определенного положительного значения  $R_\sigma$ , ДПНЦ сварных соединений сталей разной прочности совпадают. Это означает, что диаграмма более прочного соединения является продолжением таковой, отражающей сопротивление усталости менее прочного соединения. Результаты исследований других типов сварных соединений показали такое же поведение диаграмм предельных напряжений цикла при  $N > 2 \cdot 10^6$  [2]. Представление результатов исследований в виде совмещенных диаграмм позволило определить области рационального использования сталей разной прочности в элементах металлоконструкций с необрабатываемыми сварными соединениями, что, несомненно, имеет большую практическую ценность. Проведенный в работе [3] анализ публикаций показал, что каждая точка на ДПНЦ при разных средних напряжениях цикла  $\sigma_m$  или  $R_\sigma$  соответствует пределу выносливости сварного соединения со своим зна-

чением предельного установившегося остаточного напряжения  $\sigma_{ост}^y$ . Поскольку известно [4], что исходные остаточные напряжения увеличиваются пропорционально пределу текучести основного материала  $\sigma_T$ , то в сварных соединениях сталей большей прочности их значения выше. Поэтому, несмотря на одинаковые получаемые значения пределов выносливости на совпадающем участке диаграмм, т. е. при одинаковых напряжениях от внешней нагрузки, в сварных соединениях сталей большей прочности значения установившихся ОН будут большими. А учитывая, что величина  $\sigma_{ост}^y$  при прочих равных условиях играет большую роль в понижении сопротивления усталости, сравниваются результаты испытаний сварных соединений, содержащие разный уровень  $\sigma_{ост}^y$ . Кроме того, нельзя не отметить, что одинаковые пределы выносливости сварных соединений разной прочности получают при неодинаковом отношении среднего напряжения к пределу текучести материала, т. е. при разном относительном значении среднего напряжения цикла.

В связи с этим представляет интерес в проведении таких исследований, которые позволят сопоставить сопротивление усталости сварных соединений сталей разных классов прочности, содержащих одинаковый уровень предельных установившихся ОН и при одинаковом относительном значении среднего напряжения цикла в диапазоне изменения  $R_\sigma$ , при котором происходит совпадение диаграмм предельных напряжений цикла.

**Анализ полученных результатов.** Анализ проведен на примере испытаний стыковых сварных соединений низкоуглеродистой стали СтЗсп ( $\sigma_T = 300$  МПа), низколегированной стали 09Г2С

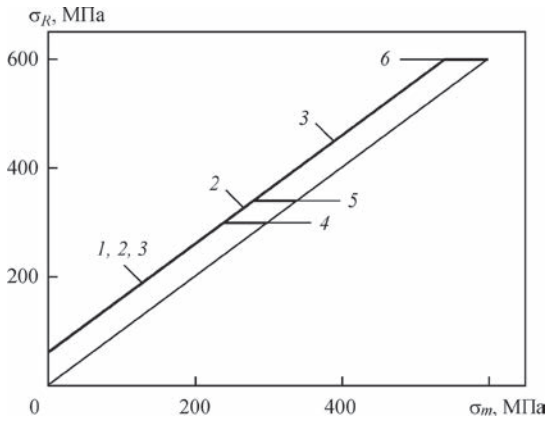


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений цикла стыковых сварных соединений с ОН низкоуглеродистой (1), низколегированной (2) и низколегированной высокопрочной (3) сталей, 4-6 — пределы текучести материала

( $\sigma_T = 340$  МПа) и низколегированной высокопрочной стали 14ХМНДФР ( $\sigma_T = 600$  МПа). Максимальные исходные ОН растяжения согласно работе [4] в зависимости от класса прочности стали находятся в диапазоне  $(0,75...0,85)\sigma_T$ , т. е. составляют в среднем, 260, 290 и 450 МПа в сварных соединениях сталей Ст3сп, 09Г2С и 14ХМНДФР, соответственно. Результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений с ОН низкоуглеродистых и низколегированных сталей разной прочности [4] в виде совмещенных диаграмм предельных напряжений цикла приведены на рис. 1. Видно, что в диапазоне изменения  $R_\sigma$  от  $-1$  до  $0,6$  или среднего напряжения цикла  $\sigma_m$  до 235 МПа их пределы выносливости  $\sigma_R$  совпадают. Поскольку предельная амплитуда напряжений  $\sigma_a$  не зависит от  $\sigma_m$ , диаграммы предельных напряжений цикла сварных соединений можно описать зависимостью в виде

$$\sigma_R = \frac{2\sigma_{-1}}{1 - R_\sigma}, \quad (1)$$

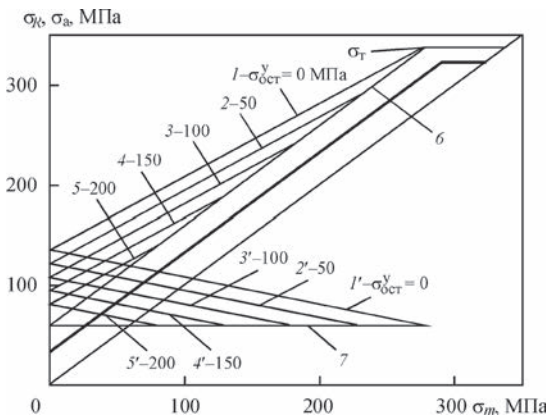


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений (1...5) и предельных амплитуд цикла (1'-5') стыковых сварных соединений низколегированной стали 09Г2С: 1, 1' — без ОН; 2...5, 2'...5' — с установившимися ОН; 6, 7 — линии предельных напряжений и минимальной предельной амплитуды цикла, соответственно

где  $\sigma_{-1} = 65$  МПа — предел выносливости сварного соединения с ОН при симметричном цикле нагружения.

В настоящей работе влияние теоретического коэффициента концентрации напряжений не учитывалось по причине принятого в литературе [5–7] определения ДПНЦ или диаграмм предельных амплитуд цикла (ДПАЦ) только от действия номинальных напряжений. Влияние ОН и напряжений, вызванных статической нагрузкой, считали идентичным [8]. Из анализа рисунка также следует, что при одинаковых значениях пределов выносливости в сварных соединениях сталей разной прочности как значения установившихся ОН, так и отношение предельных напряжений к пределу текучести материала будут разными.

Известно, что с ростом среднего напряжения цикла при условии достижения максимальных напряжений (с учетом остаточных) предела текучести материала происходит снижение исходных ОН до установившегося уровня. Проведенные ранее исследования [3] позволили определить ДПНЦ или ДПАЦ соединений с разной величиной  $\sigma_{ост}^y$ , используя результаты испытаний сварных соединений без ОН, определяемые по формулам:

$$\sigma_R = \sigma_{-1m} + (1 - \psi_\sigma)\sigma_m - \psi_\sigma \sigma_{ост}^y, \quad (2)$$

или

$$\sigma_a = \sigma_{-1m} - \psi_\sigma (\sigma_m + \sigma_{ост}^y), \quad (3)$$

где  $\sigma_{-1m}$  — предел выносливости сварного соединения без остаточных напряжений;  $\psi_\sigma$  — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла напряжений.

В качестве примера в обобщенном виде такие диаграммы стыкового сварного соединения стали 09Г2С с разным уровнем  $\sigma_{ост}^y$  приведены на рис.2. Видно, что наклонный участок диаграмм смещается на величину  $\Delta\sigma_a = \psi_\sigma \sigma_{ост}^y$  параллельно диаграммам сварных образцов без ОН, и с увеличением  $\sigma_{ост}^y$  каждая последующая диаграмма располагается ниже предыдущей. Заканчиваются они на прямых 6 и 7, где каждая точка на этих прямых соответствует или предельному напряжению цикла, или минимальной предельной амплитуде цикла  $\sigma_a^II$  сварного соединения со своим значением предельного  $\sigma_{ост}^y$ , что обеспечивает реализацию предельного цикла напряжений. При этом среднее напряжение, которое также в этом случае является предельным, смещается на величину  $\Delta\sigma_m = \sigma_{ост}^y$ . В табл. 1 приведены необходимые расчетные значения предельных напряжений, позволяющие определить подобные диаграммы сварных соединений сталей другой прочности при разных значениях  $\sigma_{ост}^y$ . Исходя из ограниченного количества экспериментальных данных [9], а также литературных

Таблица 1. Расчетные предельные напряжения (МПа) для разного уровня установившихся ОН в сварных соединениях сталей СтЗсп и 14ХМНДФР

Сталь	$\sigma_{ост}^y$ , МПа											
	0		50		100		200		300		400	
	$\sigma_R$	$\sigma_m$	$\sigma_R$	$\sigma_m$	$\sigma_R$	$\sigma_m$	$\sigma_R$	$\sigma_m$	$\sigma_R$	$\sigma_m$	$\sigma_R$	$\sigma_m$
СтЗсп ( $\sigma_{-1M} = 108$ МПа, $\psi_\sigma = 0,183$ )	300	235	250	185	200	135	100	35	-	-	-	-
14ХМНДФР ( $\sigma_{-1M} = 110$ МПа, $\psi_\sigma = 0,085$ )	600	535	-	-	500	435	400	335	300	235	200	135

данных, приведенных в работе [10], можно предположить, что ДПНЦ сварных соединений стали 14ХМНДФР без ОН может иметь параболический характер. В этом случае  $\psi_\sigma$  будет переменной величиной. Поэтому с целью удобства расчетов диаграмму несколько идеализировали и представили в виде прямой линии.

Представление данных в таком виде позволит перейти к определению предельных напряжений цикла сварных соединений исследуемых сталей при одинаковом уровне установившихся ОН. Чувствительность стыковых сварных соединений к величине  $\sigma_{ост}^y$  иллюстрирует рис. 3. Учитывая экспериментальные и расчетные данные, на рисунке представлены зависимости между отношением предельной амплитуды напряжений к соответствующему пределу выносливости и величиной установившихся ОН. В данном случае рассматривалась наиболее интересная характеристика — минимальная предельная амплитуда цикла, при которой реализуется единый предельный цикл напряжений. Из анализа полученных результатов следует, что одинаковые значения  $\sigma_{ост}^y$  в сварных соединениях сталей с более высокими механическими свойствами достигаются при более низких  $\sigma_a^n / \sigma_R$ . И эта разница увеличивается по мере повышения  $\sigma_{ост}^y$ . Также нетрудно определить значения  $\sigma_{ост}^y$  при одинаковом отношении  $\sigma_a^n / \sigma_R$ . Например,  $\sigma_a^n / \sigma_R = 0,5$  в сварных соединениях сталей СтЗсп и 14ХМНДФР можно получить при  $\sigma_{ост}^y$ , равных 170 и 440 МПа, соот-

ветственно. Пользуясь полученными данными, на рис. 4 представлены зависимости пределов выносливости сварных соединений исследуемых сталей от предельных установившихся ОН при условии, что сварные соединения разной прочности, как уже отмечалось, имеют одинаковый предел выносливости при симметричном цикле, или одинаковую минимальную предельную амплитуду напряжений от внешней нагрузки, что одно и то же, равную 65 МПа. Анализ представленных результатов показал, что с повышением  $\sigma_{ост}^y$  пределы выносливости сварных соединений низкоуглеродистой и низколегированных сталей разной прочности уменьшаются. Однако у сварных соединений сталей с более высокими механическими свойствами они остаются выше во всем исследованном диапазоне изменения  $\sigma_{ост}^y$ . Например, при изменении  $\sigma_{ост}^y$  от 50 до 200 МПа  $\sigma_R$  сварного соединения низколегированной высокопрочной стали по сравнению с низкоуглеродистой выше в 2,2 и 4,0 раза, соответственно. Если при  $\sigma_{ост}^y$ , равном 200 МПа, снижение предела выносливости сварного соединения низкоуглеродистой стали происходит в 3 раза, то для сварного соединения высокопрочной стали только в 1,5. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о повышении пределов выносливости сварных соединений с увеличением прочности стали в исследованном диапазоне изменения предельных установившихся ОН.

Кроме того, если представить приведенные на рис. 1 ДПНЦ исследуемых сварных соедине-

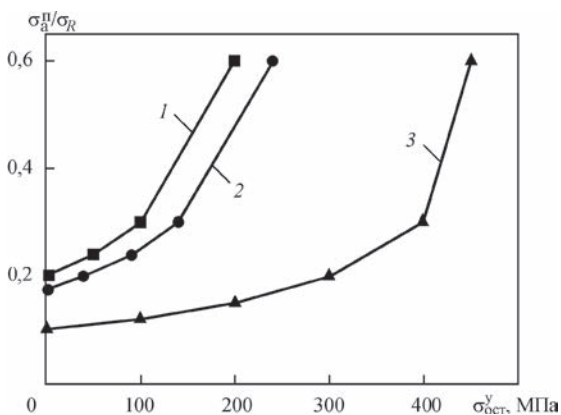


Рис. 3. Зависимости между отношением минимальной предельной амплитуды цикла к пределу выносливости и предельными установившимися ОН в стыковых сварных соединениях сталей СтЗсп (1), 09Г2С (2) и 14ХМНДФР (3)

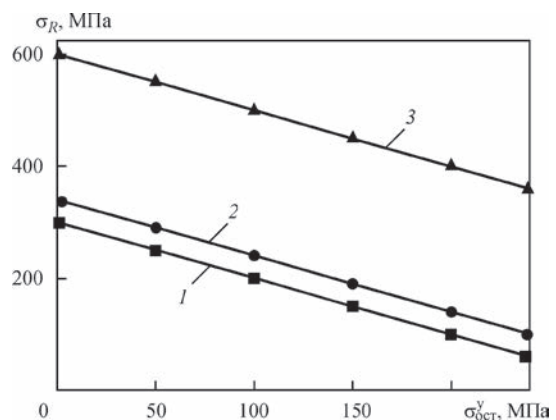


Рис. 4. Зависимости пределов выносливости стыковых сварных соединений сталей СтЗсп (1), 09Г2С (2) и 14ХМНДФР (3) от предельных установившихся ОН

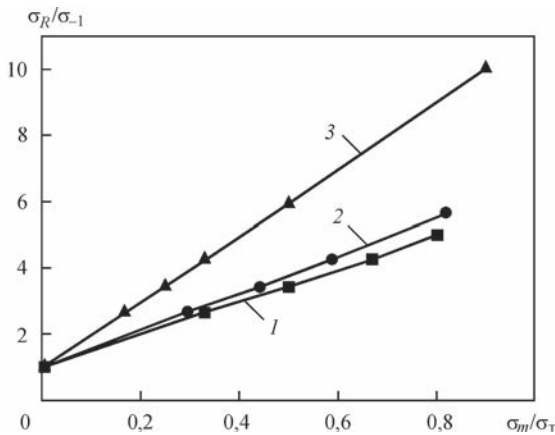


Рис. 5. Зависимости между относительными значениями пределов выносливости стыковых сварных соединений сталей СтЗсп (1), 09Г2С (2) и 14ХМНДФР (3) и средних напряжений цикла

ний в относительных координатах (рис. 5), можно увидеть, что уже изначально при одинаковых относительных значениях средних напряжений от внешней нагрузки  $\sigma_m/\sigma_T$  они расходятся. При этом сварные соединения стали большей прочности имеют более высокие относительные значения предела выносливости, меняя угол наклона диаграммы в большей степени. Представление данных в таком виде позволяет, учитывая механические свойства исследуемых сталей, анализировать полученные результаты в сопоставимых условиях испытаний. В общем виде уравнение каждой прямой можно записать как

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_{-1}} = 1 + K \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right), \quad (4)$$

где  $K = \sigma_{Ti}/\sigma_{-1}$  — угол наклона прямой;  $\sigma_{Ti}$  — предел текучести материала соответствующей стали.

Это дает возможность определения ДПНЦ сварных соединений исследуемых сталей, зная уравнение одной из них. Достаточно записать уравнение диаграммы предельных напряжений цикла, например, сварного соединения стали СтЗсп (прямая 1) в виде

$$\frac{\sigma_{R1}}{\sigma_{-1}} = 1 + \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{-1}} \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right) \quad (5)$$

и решив его относительно  $\sigma_m/\sigma_T$ , определить уравнение ДПНЦ сварного соединения стали другой прочности, которое будет иметь вид

$$\sigma_{Ri} = \sigma_{-1} + \frac{\sigma_{Ti}}{\sigma_{T1}} (\sigma_{R1} - \sigma_{-1}). \quad (6)$$

В качестве примера в табл. 2. приведены, согласно формулам 5 и 6, расчетные значения пределов выносливости сварных соединений исследуемых сталей при различных значениях  $\sigma_m/\sigma_T$ . Анализ табличных данных показал, что при одинаковом отношении  $\sigma_m/\sigma_T$ , т. е. при испытаниях в сопоста-

Таблица 2. Пределы выносливости сварных соединений исследуемых сталей

Сталь	Пределы выносливости $\sigma_R$ , МПа при разных $\sigma_m/\sigma_T$				
	0	0,1	0,3	0,5	0,7
СтЗсп	65	95	155	215	275
09Г2С	65	100	167	235	305
14ХМНДФР	65	125	245	365	485

вимых условиях, по мере повышения прочности стали предел выносливости увеличивается. Причем, с увеличением этого отношения разница между пределами выносливости возрастает.

Пользуясь данными, приведенными на рис. 4 и 5, можно определить значения среднего напряжения цикла, при котором в сварных соединениях исследуемых сталей действуют одинаковые установившиеся ОН и наоборот. Например, при  $\sigma_{ост}^y = 150$  МПа  $\sigma_m$  в сварных соединениях сталей СтЗсп, 09Г2С и 14ХМНДФР равно 85, 120 и 380 МПа, соответственно. В свою очередь, при  $\sigma_m/\sigma_T = 0,5$  значения  $\sigma_{ост}^y$  в сварных соединениях по мере увеличения механических свойств материала составляют 85, 100 и 230 МПа, что соответствует 0,28...0,38 предела текучести соответствующей стали. Кроме этого, при отсутствии полномасштабных исследований также нетрудно определить ДПНЦ исследуемых сварных соединений. Для этого путем совместного решения зависимостей (2) и (4) для заданного значения  $\sigma_m$  достаточно определить величину установившегося ОН как

$$\sigma_{ост}^y = \frac{\sigma_{-1m} - \sigma_{-1} - \psi_\sigma \sigma_m}{\psi_\sigma}, \quad (7)$$

а затем по формуле 2 определяются пределы выносливости сварных соединений исследуемых сталей с имеющимися  $\sigma_{ост}^y$ .

Таким образом, полученные данные позволили сопоставить предельные напряжения в сварных соединениях сталей разной прочности при одинаковом уровне как установившихся ОН, так и относительных действующих напряжений от внешней нагрузки, что может помочь в выборе стали при известных условиях эксплуатации.

### Выводы

1. Предложена методика определения диаграмм предельных напряжений цикла стыковых сварных соединений сталей разного класса прочности, позволяющая устанавливать закономерности изменения пределов выносливости сварных соединений при одинаковом уровне предельных установившихся остаточных напряжений и относительных напряжений от внешней нагрузки.

2. Установлено, что при одинаковом относительном значении среднего напряжения цикла сварные соединения более прочных сталей содер-



жат большие установившиеся остаточные напряжения и имеют более высокие значения предела выносливости. С повышением относительных значений средних напряжений цикла пределы выносливости сварных соединений более прочных сталей повышаются более интенсивно.

3. Показано повышение пределов выносливости сварных соединений с увеличением прочности стали в исследованном диапазоне изменения предельных установившихся остаточных напряжений.

### Список литературы

1. Кныш В.В., Соловей С.А. (2017) *Повышение долговечности сварных соединений с усталостными повреждениями*. Киев, КПИ им. Игоря Сикорского.
2. (2014) *Сталеві конструкції*. Норми проектування ДБН В.2.6-198.
3. Дегтярев В.А. (2016) Прогнозирование предельных амплитуд цикла напряжений сварных соединений с установившимися остаточными напряжениями. *Автоматическая сварка*, **10**, 16–21.
4. Труфьяков В. И. (1973) *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка.
5. Трошенко В. Т., Цыбанев Г. В., Грязнов Б. А., Налимов Ю. С. (2009) *Прочность материалов и конструкций: Усталость металлов. Влияние состояния поверхности и контактного взаимодействия*. Киев, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Т. 2.
6. Крижановский В. И., Касперская В. В., Погребняк А. Д. (2008) Оценка предельного состояния конструкционных сталей при асимметричном многоцикловом нагружении растяжением сжатием, изгибом и кручением. *Проблемы прочности*, **5**, 81–88.
7. Golub V. P. (2001) Experimental analysis of high-temperature creep, fatigue and damage. 1. Analysis methods. *Int. Appl. Mech.*, **37**, 4, 425–455.
8. Павлов В. Ф., Кирпичев В. А., Иванов В. Б. (2008) *Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочненных деталей с концентраторами напряжений*. Самара, ООО «Издательство СНЦ».
9. Мюнзе В. Х. (1968) *Усталостная прочность сварных стальных конструкций*. Москва, Машиностроение.
10. Одинг И. Л. (1962) *Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов*. Москва, Машгиз, 260 с.

### References

1. Knysh, V.V. Solovej, S.A. (2017) *Improvement of service life of welded joints with fatigue damages*. Kiev, KPI [in Russian].
2. (2014) *Steel structures*. Design standards DBN V.2.6.-198 [in Russian].
3. Degtyarev, V.A. (2016) Prediction of limiting amplitudes of cycle stresses of welded joints with steady residual stresses. *The Paton Welding J.*, **10**, 14-19.
4. Trufyakov, V.I. (1973) *Fatigue of welded joints*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Troshchenko, V.T., Tsybanev, G.V., Gryaznov, B.A., Nalimov, Yu.S. (2009) *Strength of materials and structures. Fatigue of metals. Influence of surface state and contact interaction*. Kiev, IPS, Vol. 2 [in Russian].
6. Krizhanovsky, V.I., Kasperskaya, V.V., Pogrebnyak, A.D. (2008) Evaluation of limit state of structural steels under asymmetric multicycle loading by tension, compression, bending and torsion. *Problemy Prochnosti*, **5**, 81-88 [in Russian].
7. Golub, V.P. (2001) Experimental analysis of high-temperature creep, fatigue and damage. 1: Analysis methods. *Int. Appl. Mech.*, **37**, 4, 425-455.

8. Pavlov, V.F., Kirpichyov, V.A., Ivanov, V.B. (2008) *Residual stresses and fatigue resistance of strengthened parts with stress concentrators*. Samara, ООО Izd-vo SNTs [in Russian].
9. Myunze, V.Kh. (1968) *Fatigue strength of welded steel structures*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
10. Oding, I.L. (1962) *Acceptable stresses in machine-building and cyclic strength of metals*. Moscow, Mashgiz [in Russian].

В. О. Дегтярев

Институт проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України.  
01014, м. Київ-14, вул. Тимірязєвська, 2.  
E-mail: ips@ipp.kiev.ua

### ОПР ВТОМІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ МІЦНОСТІ З УСТАЛЕНИМИ ЗАЛИШКОВИМИ НАПРУЖЕННЯМИ

В роботі запропоновано порівняльний аналіз діаграм граничних напружень циклу зварних з'єднань низьковуглецевих та низьколегованих сталей різної міцності при умові, що вони містять однаковий рівень усталених залишкових напружень. На прикладі досліджень стикових зварних з'єднань сталей Ст3сп, 09Г2С та 14ХМНДФР показано, що зварні з'єднання з більшими механічними властивостями мають більш високі границі витривалості у всьому дослідженому діапазоні змінювання граничних усталених залишкових напружень. Встановлено, що при однаковому відносному значенні середнього напруження циклу зварні з'єднання більш міцних сталей також мають більш високі значення границі витривалості, які підвищуються більш інтенсивно з підвищенням відносних значень середнього напруження циклу. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

*Ключові слова:* зварне з'єднання, амплітуда напружень циклу, середня напруга циклу, межа текучості, усталене залишкове напруження, межа витривалості, діаграма граничних напружень циклу

V. A. Degtyarev

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength.  
2 Timiryazevskaya Str., Kyiv, 01014. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

### FATIGUE RESISTANCE OF STEEL WELDED JOINTS OF DIFFERENT STRENGTH WITH FINAL RESIDUAL STRESSES

A work proposes a comparative analysis of the diagrams of cycle limit stresses in welded joints of low carbon and low alloy steels of different strength under condition that they have the same level of final residual stresses. By the example of testing of St3sp (killed), 09G2S and 14KhMNDFR steel butt welded joints it is shown that the welded joints with high mechanical properties have higher endurance limits in all investigated range of change of the limit final residual stresses. It was found that welded joints of stronger steels have also higher values of endurance limit at the same relative value of average cycle stress. They rise more intensively with increase of the relative values of cycle average stress. 10 Ref. , 2 Tabl., 5 Fig.

*Keywords:* welded joint, cycle stress amplitude, average cycle stress, yield limit, final residual stress, endurance limit, diagram of cycle limit stresses

Поступила в редакцию 23.01.2018