

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

УДК 330.15.332

© Чигарев В.В.¹, Коваленко И.В.²

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ

В статье приведены исследования влияния остаточных напряжений в околошовной зоне плакирующего слоя двухслойной стали ВСтЗсп5+10Х13 на эксплуатационные характеристики конструкции. Приведен анализ сравнительных характеристик эксплуатационных свойств различных биметаллических сварных соединений. Предложенные расчеты позволяют прогнозировать период работоспособности металлоконструкций до периода выхода из строя.

Ключевые слова: сварка биметаллов, остаточные напряжения, плакирующий слой.

Чигарьев В.В., Коваленко И.В. Оцінка впливу величини остаточних напружень у зварних з'єднаннях двошарових сталей. У статті доведені дослідження впливу остаточних напружень у околошовній зоні плакуючого шару, двошарового шару двошарової сталі ВСтЗсп5+10Х13 на експлуатаційні властивості контракції. Наведено аналіз зрівнювальних характеристик експлуатаційних властивостей різних біметалевих зварних з'єднань. Запропоновані розрахунки дозволять прогнозувати період працездатності металеві конструкції до періоду виходу з ладу.

Ключові слова: зварювання біметалів, остаточні напруження, плакуючий шар.

V.V. Chigaryov, I.V. Kovalenko. Evaluation of the influence of the value of residual stresses in welded joints of double-sheet steels. The article presents the research of the influence of intensity in melting zone outward layer steel ВСтЗсп5+10Х13 for extend construction. Te proposed estimations make it possible to predict the service lives of metal structures until failure.

Keywords: bi-metal welding, influence intensity, outward layer.

Постановка проблемы. Постоянное повышение требований к качеству изготовления металлургических агрегатов, выполнению их ремонтов, с применением сварки биметаллов, обуславливают появление новых методов расчета и определения эксплуатационных свойств. Особую роль играет прогноз о длительности эксплуатации металлоконструкции. В связи с этим, разработки в указанном направлении являются весьма актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций. Свойства биметаллических сталей ВСтЗсп5 + 10Х13 широко известны [1], применяются как коррозионно стойкие и термостойкие материалы при изготовлении деталей работающих в воде, разбавленных растворах солей, агрессивных термических средах, в нефтехимической промышленно-

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет» г. Мариуполь

² ведущий инженер ПАО «ММК им. Ильича» г. Мариуполь

сти. Имеется информация по определению свойств коррозионного износа и значением скорости общей коррозии 0.1-0.3 мм/год.

В Украине представлен ряд предварительных исследований по определению малоциклового усталости различных композиционных пар. Во всех случаях представлены данные расчетов и экспериментов без учета деформаций на нижней поверхности образца при удалении слоев α_i и δ_i [2]. При этом важно влияние этих параметров на составление подынтегрального выражения, с указанием полусуммы и значения интеграла. Также важным фактором является величина $G(\alpha_i)$ со значением коэффициентов, дающих полную картину наличия величины остаточных напряжений в плакирующем слое.

Его появлению способствуют значительные остаточные напряжения в зоне сварки возникающие под действием сварочных термометформаций цикла [3]. По мере вылеживания сварных заготовок отмечалось снижение α – мартенсита, в металле ЗТВ соединений в результате восстановления в них напряжений и потери стабильности геометрических размеров. В результате механического перемешивания в процессе сварки и кристаллизации возникают пониженные прочностные и пластические свойства, по пределу прочности, текучести, а также циклических испытаний.

Цель статьи – расчетная оценка величины остаточных напряжений околошовной зоны плакирующего слоя, биметалла Вст3сп+10X13.

Изложение основного материала. Для проведения исследований по теме были использованы пластины размером 30x100x600 мм из, биметалла марки Вст3сп+10X13, поставляемой по ТУ I4-I-I670-86.

Измерения в остаточных напряжений производили на образцах в состоянии поставки и после одного цикла нагружения [3] из следующих композиций: Вст3сп+08X13 Вст3сп+12X13 Вст3сп+10X17Н13М2Т. Состояние образцов и значения пределов текучести основного и плакирующего слоев показаны в таблице.

Таблица

Показатели напряжений исследуемых сталей				
№ обр.	Состав композиции	G_{02}^{OM} , кг/мм ²	G_{02}^n , кг/мм ²	G_{cp} , кг/мм ²
12-9	Вст3сп+08X13	134	90	112
12-9-1	---«---	134	90	112
12-19	---«---	134	90	112
16-9	Вст3сп+12X13	134	110	122
16-9-1	Вст3сп+12X13	134	110	122
2С-3	Вст3сп+10X17Н13М2Т	134	80	107
14-10	Вст3сп+10X17Н13М2Т	134	52	93

Расчет ключевых значений и показателей основан на формуле 1.

$$\sigma_a = \frac{1}{2} E (h - a) \frac{d\varepsilon}{d\delta} (a) - 3 E (h - a) \int_0^a \frac{\varepsilon(\delta)}{(h - a)^2} d\delta, \quad (1)$$

где σ_a - напряжение в образце на расстоянии Q от поверхности; a - толщина всех снятых слоёв; h - общая толщина образца; E - модуль упругости; δ - толщина снимаемого слоя; ε_a - деформация на нижней поверхности образца при удалении слоя a ; $\varepsilon_{(\delta)}$ - деформация на нижней поверхности образца при удалении слоя δ .

Основными контролируемыми параметрами расчета являются: толщина снимае-

мого слоя Δ_i мм, общая толщина всех снятых слоев α_i , мм, деформация, замеренная тензодатчиком сопротивления $\varepsilon(\alpha_i) = \varepsilon_i$.

Для вычисления производных принималась параболическая аппроксимация:

$$\frac{d\varepsilon}{d\alpha}(0) = \varepsilon_1 \left(\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Delta_1 \Delta_2} \right) + \varepsilon_2 \left[\frac{-\Delta_1}{\Delta_2(\Delta_1 + \Delta_2)} \right] = \varepsilon_1 K_0^{(2)} + \varepsilon_2 K_0^{(3)};$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\alpha}(\alpha_i) = \varepsilon_{i-1} \left[\frac{-\Delta_{i+1}}{\Delta_i(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right] + \varepsilon_i \left(\frac{\Delta_{i+1} - \Delta_i}{\Delta_i \Delta_{i+1}} \right) + \varepsilon_{i+1} \left[\frac{\Delta_i}{\Delta_{i+1}(\Delta_i + \Delta_{i+1})} \right] = \quad (2)$$

$$\varepsilon_{i-1} K_i^{(1)} + \varepsilon_i K_i^{(2)} + \varepsilon_{i+1} K_i^{(3)}.$$

В столбце II приведено подынтегральное выражение, далее указываются полсуммы и значения интеграла. Сравнительная величина остаточного напряжения $G(\alpha_i)$ (сумма значений в столбцах) приведена в [3].

По результатам измерения построены эпюры распределения остаточных напряжений по сечению лакирующего слоя и основного слоев, которые показаны на рис. 1.

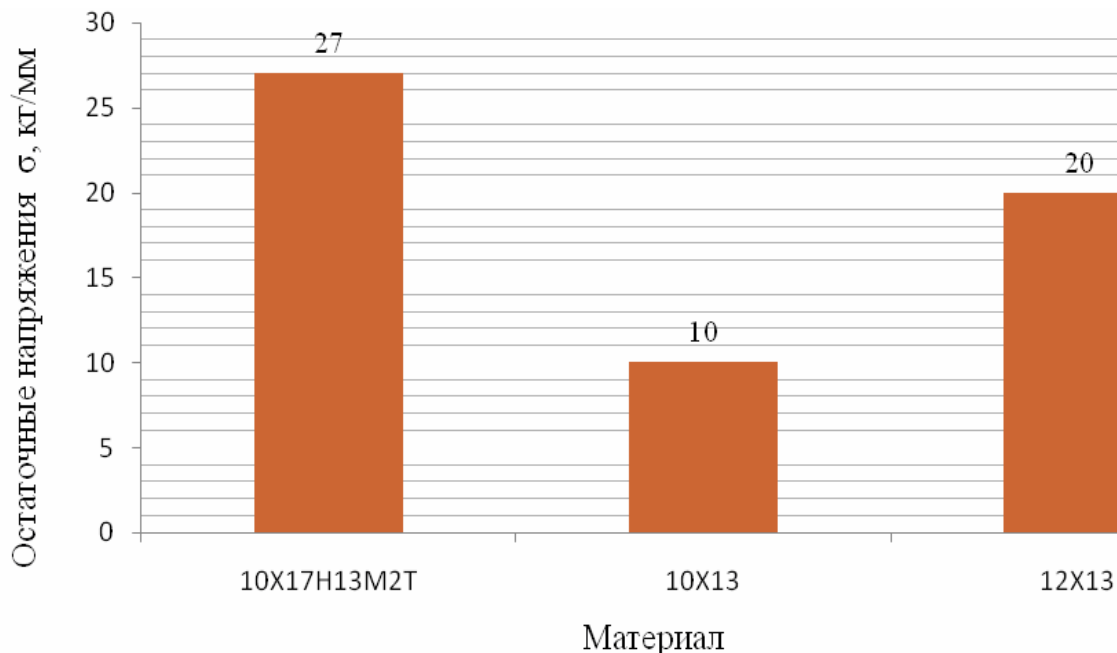


Рис. 1 – Зависимость величины остаточных напряжений в околошовной зоне от материала лакирующего слоя

Испытания проводили на установках УДИ-ф1 в условиях двухосного повторно-статического изгиба с частотой 10 цикл/мин. Лакирующий слой, расположенный со стороны растянутых волокон образца, контактировал с коррозионной средой – 3% раствором поваренной соли. Размах деформации на поверхности образца составлял $\varepsilon_{cp} = 0,0031$, что соответствовало амплитуде напряжений в аналогичном гомогенном образце 90 кг/мм. Поэтому характер работы композиций 4, 5, 6 соответствует первому из рассмотренных случаев, композиции 2 и 3 – второму случаю и композиции 1 – третьему случаю.

Для оценки результатов испытаний определялось количество циклов нагружения до обнаружения первой трещины и количество циклов нагружений до нарушения герметичности, т. е. до полного разрушения.

Результаты испытания образцов показаны на диаграмме рис 1. Окрашенная часть столбика соответствует живучести образца с трещиной, цифры у основания заштрихованной части показывают количество циклов нагружений до появления первой трещины длиной 10мм, а цифры в верхней части столбца указывают на число циклов до нарушения герметичности образца.

Из рассмотрения эпюр, для образцов не подверженных нагружению можно видеть, что во всех исследованных композициях в плакирующем слое имеются остаточные напряжения растяжения. Характер распределения напряжений по сечению плакирующего слоя примерно одинаков [1] для всех образцов: постепенное увеличение от линии сплавления слоев до максимального значения на глубине $0,2 \div 0,8$ мм от свободной поверхности плакирующего слоя. По мере приближения к поверхности плакирующего слоя величина напряжений уменьшается.

Максимальные значения остаточных напряжений для композиции Вст3сп + 12Х13, составляют около 20 кг/мм^2 , а для композиции Вст3сп + 08Х13 составляют около 14 кг/мм^2 , следует обратить внимание на то, что наличие остаточных напряжений растяжения в плакирующем слое может существенно повлиять на долговечность образца, особенно когда оба слоя композиции подвержены нагружению в пределах упругой области.

Результаты измерения и расчета остаточных напряжений в плакирующем слое, после нагружения образца, когда $\varepsilon_{02}'' < \varepsilon_{cp} < 2\varepsilon_0^r$ свидетельствуют о наличии остаточных напряжений сжатия, причем их максимальная величина различна и зависит от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя. Так, в образце 14–10 (Вст3сп + 12Х13), предварительно нагруженном до $G_{cp} = 90 \text{ кг/мм}^2$ максимальная величина остаточных напряжений сжатия составляет 10 кг/мм^2 , а в образце 12-19 (Вст3сп + 08Х13) нагруженном $G_{cp} = 105 \text{ кг/мм}^2 - 20 \text{ кг/мм}^2$.

Представляет интерес рассмотрение эпюры образца 13-1 (Вст3сп + 10Х17Н13М2Т), у которого предел текучести материала плакирующего слоя составляет 27 кг/мм^2 . Как видно, напряжения распределяются с равномерным уменьшением от максимума на поверхности до линии сплавления, после пересечения которой меняется их знак. Следует обратить внимание на тот факт, что в этом образце максимальная величина остаточных напряжений наибольшая по сравнению с аналогичными значениями для других образцов и соответствует напряжениям предела текучести материала плакирующего слоя [4].

Это видимо, связано с тем, что рабочие деформации образца значительно превосходят деформации предела текучести материала плакирующего слоя т.е. соблюдается условие, когда $\varepsilon_{cp} > \varepsilon_{02}''$, В этом случае остаточные напряжения сжатия могут быть равны напряжениям предела текучести материала плакирующего слоя, т.к. плакирующий слой подвержен упруго-пластическому деформированию как при нагружении, так и при сбросе рабочей нагрузки.

Также одним из критических и ключевых значений в процессе эксплуатации является величина толщины плакирующего слоя, при рассмотрении в данной статье и текущих исследованиях выявлена прямо – пропорциональная зависимость этих величин.

Данные представленные на рис. 3 наглядно выражают вышеуказанные предположения, и наименьшие значения остаточных напряжений, а значит и наиболее длительная работоспособность изготовленных образцов и будущей металлоконструкции относятся к изделиям с плакирующим слоем 10Х13.

Данные [3] позволяют утверждать что тенденция и закономерность представленная на рис. 2, абсолютно адекватно и полноценно обеспечит оценку образцов и металлоконструкции целиком.

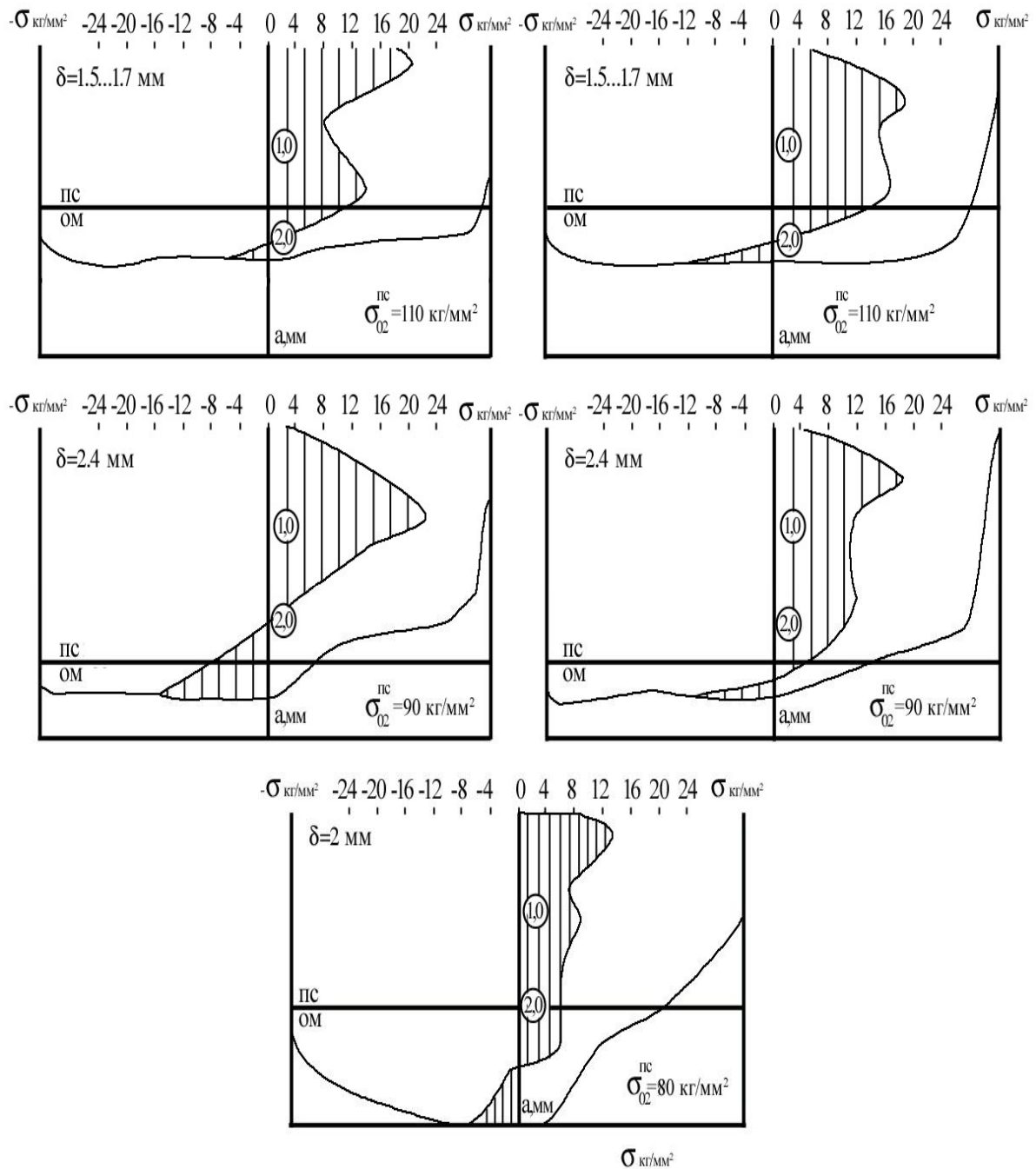


Рис. 2 – Эпюры распределения остаточных напряжений по сечению в зависимости от толщины плакирующего слоя

Такой характер расположения кривых, видимо объясняется тем, что сталь Вст3сп + 08Х13 при размахе деформаций $\varepsilon_{cp} < 4 \cdot 10^{-3}$ деформируется в пределах упругой области, в то время как стали Вст3сп+12Х13, во всем диапазоне рабочих нагрузок деформируются за пределами упругой области при первом нагружении, т. е. для них справедливо условие $\varepsilon_{02}'' < \varepsilon_{cp} < 2\varepsilon_{02}''$.

Представляют интерес результаты, полученные для образцов изготовленных из Вст3сп+10Х17Н13М2Т предел текучести которого составляет $G_{02} = 26,7 \text{ кг/мм}^2$. В процессе нагружения эти образцы подвергались знакопеременному упруго-пластическому деформированию за пределами упругой области в соответствии с условием $\varepsilon_{cp} > 2\varepsilon_{02}''$.

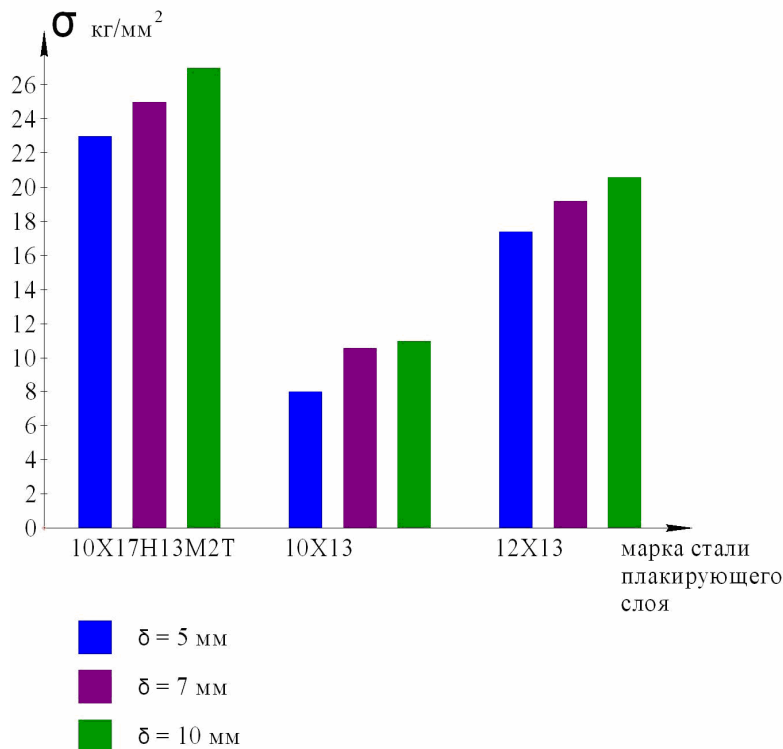


Рис. 3 – Влияние толщины лакирующего слоя на величину остаточных напряжений в околошовной зоне

Долговечность этих образцов во всех диапазоне рабочих нагрузок значительно ниже по сравнению с другими исследуемыми сталями.

Интересно отметить, что для стали ВстЗсп+12Х13 это условие сохраняется даже при максимальном размахе деформаций равным $6,2 \cdot 10^{-3}$, долговечность образцов этой стали в области очень высоких деформаций несколько выше по сравнению с образцами из сталей ВстЗсп+08Х13 и ВстЗсп+12Х13, которые при максимальном размахе деформаций работают при условии $\varepsilon_{cp} > 2\varepsilon_{02}^H$. Согласно рисунку 2 в области малых деформаций, кривая характеризуемая сталь ВстЗсп+12Х13 располагается ниже по сравнению с кривыми ВстЗсп+10Х13 и ВстЗсп+10Х17Н13М2Т.

Таким образом и этот эксперимент подтверждает высказанные соображения относительно подбора пар. Как и предполагалось, лучшие результаты могут быть получены в том случае, когда $\varepsilon_{02}^H < \varepsilon_{cp} < 2\varepsilon_{02}^H$.

Анализируя данные представленные на рисунке 3 следует вывод о том что прямо пропорциональная зависимость между толщиной лакирующего слоя и маркой стали этого слоя отвечает требованиям $\varepsilon_{02}^H < \varepsilon_p < 2\varepsilon_{02}^H$. Это видимо, связано с тем, что рабочие деформации образца значительно превосходят деформации предела текучести материала лакирующего слоя т.е. соблюдается условие, когда $\varepsilon_{cp} > \varepsilon_{02}^H$. В этом случае остаточные напряжения сжатия могут быть равны напряжениям предела текучести материала лакирующего слоя, т.к. лакирующий слой подвержен упруго-пластическому деформированию как при нагружении, так и при сбросе рабочей нагрузки.

В ходе проводимых исследований учитывалась величина продольных остаточных напряжений как правило растягивающих, которые являются следствием выбора толщины лакирующего слоя рис. 3. Также следует отметить что на зависимость изображенную на рис.3, оказывают влияние различные степени пластической деформации

при сварке, нагрев и охлаждение [3]. На основе анализа эпюр остаточных напряжений σ_a в образцах при сварке автоматом АДФ 1002 типа 2ТС – 17С можно выделить следующие особенности: зона сжимающих напряжений предопределяет поведение и свойства металла с тем что толщина плакирующего слоя прямо пропорциональна величине остаточных напряжений в плакирующем слое всех исследуемых образцов покрытых сталями – 10X17H13M2T, 10X13, 12X13.

Выводы

1. В результате теоретического расчета установлены значения остаточных напряжений в околошовной зоне соединения ВстЗсп + 10X13, с величиной 10 кг/мм^2 , что удовлетворяет условию $\varepsilon_{02}^n < \varepsilon_p < 2\varepsilon_{02}^o$, что свидетельствует о наличии запаса эксплуатационной надежности и остаточных напряжений сжатия, причем их максимальная величина различна и зависит от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя.
2. Установлено что остаточные напряжения сжатия и их максимальная величина различны, и зависят от уровня нагрузки и предела текучести материала плакирующего слоя.

Список использованных источников:

1. Земзин В.Н. Сварные соединения разнородных сталей / В.Н. Земзин. – Л.: Машиностроение, 1966. – 190 с.
2. Мовчан Б.А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах / Б.А. Мовчан. – К.: Гостехиздат УССР, 1968. – 230 с.
3. Касаткин Б.И. Методика исследования кинетики деформаций при замедленном разрушении / Б.И. Касаткин, В.Я. Бреднев, В.В. Волков // Автоматическая сварка. – 1981. – № 11. – С. 1-11.
4. Патон Б.Е. Новые возможности автоматической сварки в машиностроении / Б.Е. Патон, Л.Б. Медовар, В.Е. Саенко // Металлургия машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 2-5.

Bibliography:

1. Zemzin V.N. Welding connector double-sheet steel / V.N. Zemzin. –L.: Mashinostroenie, 1966. – 190 p. (Rus.)
2. Movchan B.A. Microscopically not lase in liquid steel / B.A. Movchan. – K: Gostechizdat USSR, 1968. – 230 p. (Ukr.)
3. Kasatkin B.I. Methodology reacting kinetics of deformation under middle deciding / B.I. Kasatkin, V.Y. Brednev, V.V. Volkov // Avtomaticheskaya Svarka. – 1981. – P. 2-11. (Ukr.)
4. Paton B.I. New exctntic automatic welding in mashbilding / B.I. Paton, L.B. Medovar, V.E. Saenko // Metalurgia mashinostroeniya. – 2003. – P. 2-5. (Ukr.)

Рецензент: В.И. Щетинина
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 22.04.2013