

УДК 669.15

Л.И. Паришук¹

ИССЛЕДОВАНИЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ КОНТРОЛИРУЕМОГО НАГРЕВА БЛИЗЛЕЖАЩИХ ОБЛАСТЕЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-6-6

Представлены результаты исследования влияния внешних нагрузок и вида сварного соединения на напряженно-деформированное состояние в шве при электронно-лучевой сварке. Показано, что монопроходность при аргоно-дуговой сварке больших толщин и большие остаточные деформации, возникающие в сварном соединении, приводят к ослаблению удержания элементов конструкции. Если условия технического задания ограничивают нагрев до определенной температуры во время сварки конструктивных элементов, то это значительно увеличивает продолжительность сварки, поэтому наложение сварного шва производят небольшими участками. Показана эффективность применения электронно-лучевой сварки по сравнению с аргоно-дуговой сваркой. Рассчитано температурное поле и напряженно-деформированное состояние сварного соединения во время сварки и после нее.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сварное соединение, расчет напряженно-деформированного и температурного состояния.

The effect of external loads and the type of welded joint on the stress-strain state in the seam at the electron beam welding. It is shown that the argon arc welding, which is characterized by multilayer during welding of large thickness and a large residual strain in the welded joint leads to a weakening of the retention of structural elements. In some cases, the technical task conditions on structural elements should not be heated above a certain temperature during welding. This constraint greatly increases the TIG welding, since the imposition of a weld produced in small areas. The efficiency of electron beam welding with respect to TIG. Calculated temperature field and the stress-strain state of welded joint during welding and after.

Keywords: electron-beam welding, residual stresses, stress-strain calculation and temperature state.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В России существуют направления развития материалов и технологий для производства конкурентоспособной авиационной техники [1–8], которые предполагают разработку новых технологий, приводящих к существенному экономическому эффекту. Для удешевления продукции требуется внедрение таких подходов в производство. При производстве изделий сварка зачастую является последней операцией при создании конструкций, поэтому к ней предъявляются все возрастающие требования по выбору режимов сварки и виду сварного соединения.

Одной из практических задач при производстве авиационной и космической техники является закрепление резиновой оболочки. Для закрепления резиновой оболочки на изделии (рис. 1) используют опорное и установочное кольца – ее

зжимают между кольцами и закрепляют их аргоно-дуговой сваркой. Аргоно-дуговая сварка рассматриваемых конструкционных материалов изучалась в работах [9–14]. Многопроходность аргоно-дуговой сварки и большие остаточные деформации в сварном соединении приводят к ослаблению обжатия резиновой оболочки. Кроме того, по условиям технического задания резиновая оболочка не должна нагреваться во время сварки выше температуры 80°C . В связи с этим ограничением значительно увеличивается продолжительность сварки, так как наложение сварного шва производят небольшими участками с паузами.

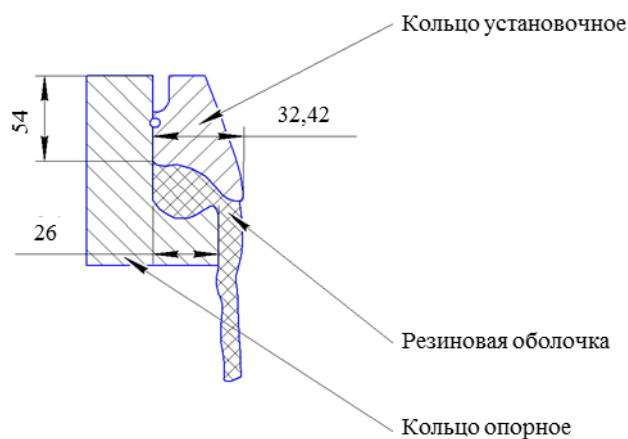


Рис. 1. Эскиз узла закрепления резиновой оболочки

Для проведения аргоно-дуговой сварки колец «с разделкой» используют специфичное сварочное соединение, изображенное на рис. 2.

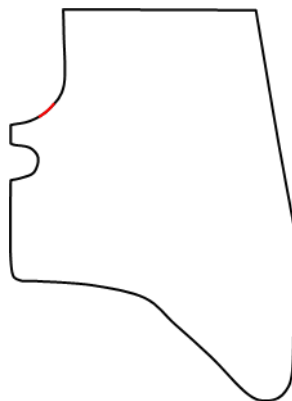


Рис. 2. Сечение кольца для аргоно-дуговой сварки

Электронно-лучевая сварка, в отличие от аргоно-дуговой, позволяет сваривать изделия большой толщины высококонцентрированным потоком энергии за один проход и не создает больших областей с остаточными деформациями, поэтому данный вид сварки обладает следующими технологическими возможностями:

- позволяет получать стыковые, нахлесточные и тавровые сварные соединения за один проход без «разделки» свариваемых кромок толщиной от 0,1 до 130 мм;
- обеспечивает надежную защиту металла сварного соединения от попадания газов и примесей;
- позволяет получать сварные соединения с узкой зоной термического влияния и малой областью остаточных деформаций;

– позволяет осуществлять безинерционное управление источником нагрева (электронным пучком) и выполнять сварку швов сложного контура;

– обеспечивает выполнение сварочного процесса в условиях полной защиты обслуживающего персонала от газовых выделений и тепловых излучений из зоны сварки, а также рентгеновского излучения.

Указанные преимущества электронно-лучевой сварки позволяют получать значительный технико-экономический эффект в промышленных условиях по сравнению с традиционными дуговыми способами сварки. В связи с этим при сварке колец было предложено перейти от аргоно-дуговой к электронно-лучевой сварке.

Для поиска режима сварки, обеспечивающего заданную температуру в области резиновой оболочки, проведена оценка температурного поля в кольцах при электронно-лучевой сварке, а также определено напряженно-деформированное состояние шва до и после сварки. Контроль напряженного состояния сварных швов изделия важен для определения гарантии сохранности свойств на длительный срок.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.8. «Технологии сварки плавлением новых конструкционных материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Эксперименты по электронно-лучевой сварке проводились на модельных образцах толщиной 40 мм из титанового сплава типа ВТ6. Сварку выполняли на промышленной установке ЭЛСМ-03 «АЭЛТК-75/7.5-4.5». Внешний вид установки представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид установки ЭЛСМ-03 «АЭЛТК-75/7.5-4.5»

Методика включала пять видов исследований. Исследования макроструктуры выполняли с помощью металлографического микроскопа типа ММР-4. Проводились испытания на прочность сварных соединений. В рамках структурно-аналитической теории прочности выполнено теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния материала сварного шва. Определение температурного поля в сварном шве при закреплении колец выполнено путем численного решения уравнения теплопроводности. Напряженно-деформированное состояние кольца, находящегося под воздействием сжатой резиновой оболочки, определяли с помощью программы DesignSpace 6.0.1.

Результаты и обсуждение

При сравнении напряженно-деформированного состояния сварных швов, созданных электронным лучом и дугой в среде аргона, пришли к выводу, что напряженное состояние сварного шва после первого вида сварки характеризуется большим значением остаточных напряжений.

В результате металлографических исследований сварных швов, полученных электронно-лучевой сваркой, установлено, что макроструктура металла шва в центральной части представляет собой плотную, дисперсную, дендритную структуру. Граница сплавления тонкая, четкая без грубых выделений по границам зерен. Зона термического влияния состоит из рекристаллизованных равновесных зерен игольчатого строения. Зона термического влияния имеет плавный переход к основному металлу без огрублений границ зерен, каких-либо дефектов в сварном шве не обнаружено.

Испытания на прочность показали, что сварные соединения, выполненные электронно-лучевой сваркой, имеют большую прочность, чем сварные соединения, выполненные аргоно-дуговой сваркой. При этом разрушение образцов со швами, сваренными электронным лучом, всегда происходило по основному металлу.

Перед сваркой рассматриваемого узла его сборка осуществляется следующим образом: производится обжатие резиновой оболочки между установочным и опорным кольцами с общим усилием 450 т, после сварки колец между собой сжимающую нагрузку снимают. При изготовлении узла в его сварном шве возникает напряженное состояние, зависящее от сварочных остаточных напряжений и напряжений, возникающих от реакции сжатой резиновой оболочки.

Высококонтентрированный поток энергии, пронизывающий толщину сварного соединения при электронно-лучевой сварке, позволяет исключить «разделку» в сварном соединении за один проход луча (рис. 2). При использовании программы DesignSpace 6.0.1 оценено напряжение в кольце, обусловленное действием сжатой резиновой оболочки. При расчете граничные условия учитывали реакцию резины на кольцо с величиной давления 10 МПа и жесткого закрепления области сварного шва. Максимальная величина напряжения растяжения возникала в корне шва и составляла 350 МПа. С целью снижения напряжений в кольце свариваемая толщина была увеличена на 5 мм. Сечение видоизмененного соединения представлено на рис. 4, а напряженное состояние в рассматриваемом сечении – на рис. 5. Видно, что наиболее нагруженной точкой является корень шва, напряжение в котором имеет значение 260 МПа. Кроме того, из анализа напряженного состояния следует, что сварной шов находится в неоднородном напряженном состоянии – в его середине находится ненагруженная область.

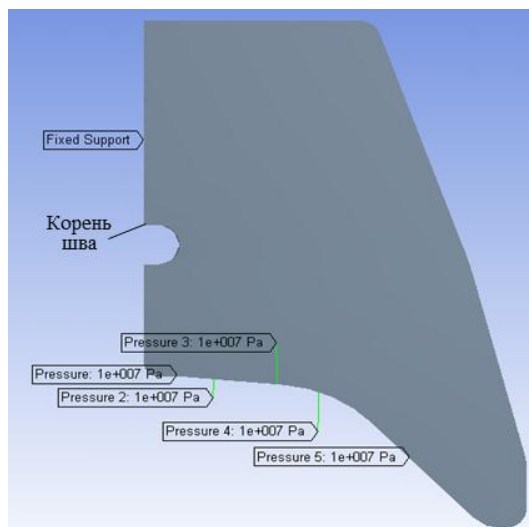


Рис. 4. Сечение установочного кольца для электронно-лучевой сварки

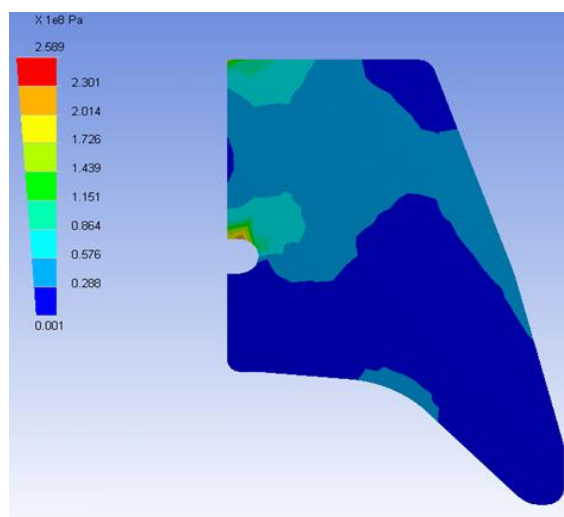


Рис. 5. Напряженное состояние кольца при воздействии сжатой резины без учета сварочных остаточных напряжений

Для определения напряженно-деформированного состояния в сварном шве, создана математическая модель в рамках структурно-аналитической теории прочности [16]. В модели учтены следующие физические явления, которые происходят в материале при сварке: дислокационная пластичность и релаксация напряжений. Все эти явления считаются взаимосвязанными. Приняли, что при сварке напряженное состояние характеризуется выражением:

$$\sigma(t) = \frac{E}{1-\nu} \cdot (\epsilon_{ik}^T + \epsilon_{ik}^H), \tag{1}$$

где $\epsilon_{ik}^T = \alpha(T - T_0)$ – деформация теплового расширения; ϵ_{ik}^H – тензор неупругой деформации, обусловленный активной пластичностью, ползучестью и фазовыми превращениями; T, T_0 – соответственно текущая и начальная температура в сварном шве; ν – коэффициент Пуассона.

Согласно структурно-аналитической теории скорость макроскопической деформации $\dot{\epsilon}_{ik}^H$ определяли в виде:

$$\dot{\epsilon}_{ik}^H = \frac{1}{8\pi^2} \int \alpha_{ip} \alpha_{kq} (\dot{\beta}_{pq}^a + \dot{\beta}_{pq}^t) d^3\Omega, \tag{2}$$

где $\dot{\beta}_{pq}^a$ – скорость активного микропластического сдвига (здесь и далее – точка над символом соответствует производной по времени); $\dot{\beta}_{pq}^t$ – термофлуктуационная скорость микродеформации сдвига; α_{ip}, α_{kq} – направляющие косинусы углов, переводящие локальные базисы в лабораторный; Ω – угол, задающий взаимную ориентацию систем локальных базисов с лабораторным.

Обе величины обусловлены пластической деформацией, происходящей посредством дислокационного скольжения по определенным кристаллографическим плоскостям. В зависимости от характера процесса активной деформации этот закон может быть представлен в виде:

$$\dot{\beta}_{ik}^a = A'_a \frac{\tau_{ik}^n}{T_\tau} (\dot{T}_\tau - \dot{\tau}_0^S) H(T_\tau - \tau^S) H(\dot{T}_\tau - \dot{\tau}_0^S), \tag{3}$$

а выражение для термофлуктуационной скорости выберем в виде:

$$\dot{\beta}_{pq}^t = A'_t \exp(-U/kT) \tau_{ik}^n, \tag{4}$$

где $\tau_{ik} = \alpha_{pi} \alpha_{qk} (\sigma_{pq} - \rho_{pq})$ – тензор эффективных микронапряжений; T_τ – интенсивность касательных напряжений в плоскости скольжения; τ_0^S , τ^S – кристаллографический предел текучести и текущее напряжение течения кристаллографического сдвига; A'_a , A'_t – постоянные материала; n – показатель степени; H – функция Хивисайда; ρ_{pq} – тензор ориентированных микронапряжений.

Закон изменения ориентированных микронапряжений ($\dot{\rho}_{ik}$) запишем в виде:

$$\dot{\rho}_{ik} = h_0 \dot{\epsilon}_{ik}^H, \quad (5)$$

где h_0 – характеристика материала.

Ориентированные микронапряжения, возникающие вследствие дислокационного скольжения, будут уменьшать приложенные напряжения σ_{ik} .

Закон изменения кристаллографического предела текучести можно записать в виде:

$$\dot{\tau}_0^S = \dot{\tau}^S - A_a^{-1} \dot{\Gamma}_\beta, \quad (6)$$

где A_a – модуль пластичности, обратный по величине коэффициенту деформационного упрочнения при сдвиге; Γ_β – интенсивность сдвига в плоскости скольжения.

Систему уравнений (1)–(6) решали численными методами со значениями констант для исследуемого материала. Результаты расчетов позволили определить значения термических напряжений и деформаций в сварном шве. Для этого достаточно располагать сведениями о механических характеристиках материала и условиях сварки. В результате расчетов установлено, что остаточные напряжения в сварном шве после сварки составляют 500 МПа.

После сварки колец сжимающая нагрузка снимается, в результате чего напряженное состояние в корне шва суммируется с растягивающим напряжением реакции сжатой резины и достигает значения 770 МПа. Данная точка является самой нагруженной. В вершине сварного шва, напротив, напряжения от сжатой резины вычитаются из остаточных сварочных напряжений и результирующие напряжения имеют положительное значение, равное 230 МПа.

Руководствуясь данными работы [17] и экспериментальными результатами, полученными в рамках данной работы, определена зависимость мощности электронного потока для сварки от скорости и толщины сварного соединения титановых сплавов. Данная зависимость имеет следующий вид:

$$N = kSV, \quad (7)$$

где N – минимальная расчетная мощность электронного пучка, кВт; S – расчетная площадь сечения сварного шва, мм²; V – скорость сварки, мм/с; k – коэффициент, который для титана и его сплавов составляет 0,0079 кВт·с/мм³.

С использованием вышеприведенной формулы определена мощность электронного луча для сварки титанового сплава толщиной 40 мм при скорости сварки 12 мм/с, которая составила 8 кВт. Для описания температурного состояния в сварном соединении при сварке использовали уравнение теплопроводности с начальными и конечными условиями.

Уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(r, t) = a \Delta T(r, t) + f(r, t), \quad (8)$$

где $T(r, t)$ – температура; $f(r, t)$ – объемный источник тепла; a – коэффициент теплопроводности материала.

Теплообмен с окружающей средой, имеющей комнатную температуру, осуществляется излучением:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(r, t) = \sigma(T^4 - 293^4), \quad (9)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана; λ – коэффициент теплопроводности.

Начальная температура технологического образца перед сваркой была комнатной. Данную задачу решали численно с помощью метода конечных разностей. Необходимые теплофизические характеристики исследуемого сплава взяты из работы [18].

Далее приведена оценка температурного поля в кольце при сварке. На рис. 6 показана зависимость температуры в сварном шве от времени при скорости электронного луча 12 мм/с. При данных условиях сварки скорости нарастания и убывания температуры очень значительные, что приводит к возникновению больших остаточных напряжений в сварном шве, которые сопоставимыми с максимальными расчетными, равными 670 МПа. На рис. 7 представлено изменение температуры в области резиновой оболочки непосредственно под сварным швом при скорости сварки 12 мм/с. Видно, что максимальная температура в области резиновой оболочки для кольца составляет 70°C.

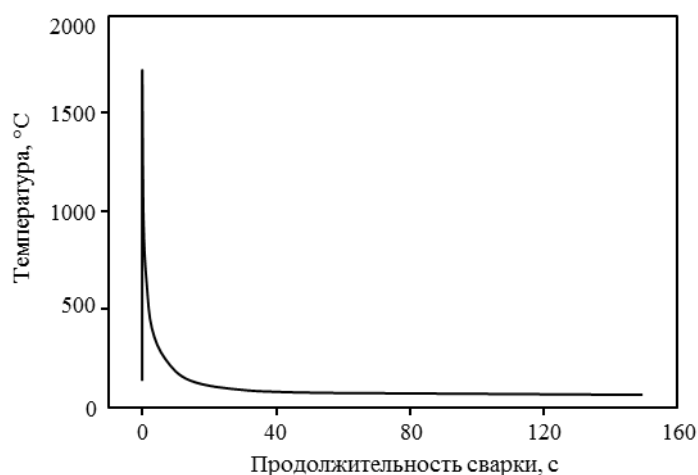


Рис. 6. Зависимость температуры в сварном шве от продолжительности при скорости сварки 12 мм/с

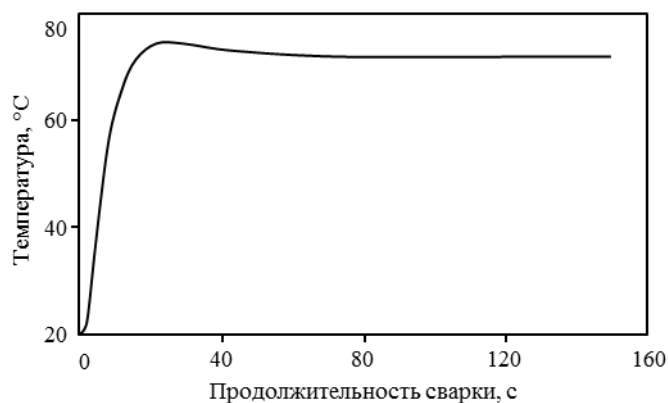


Рис. 7. Зависимость температуры в области нахождения резиновой оболочки от продолжительности при сварке кольца электронным лучом

Результаты выполненных теоретических исследований нашли практическое применение. Закрепление резиновой оболочки с помощью колец методом электронно-лучевой сварки позволило сократить продолжительность сварки с 40 до 1 ч.

Заключения

В результате исследований установлено, что:

- каких-либо дефектов в сварном шве не обнаружено; микроструктура сварного шва плотная, дисперсная; границы сплавления четкие, тонкие без выделений по границам зерен; зона термического влияния составляет ~1 мм от границ зоны сплавления;
- с целью исключения перегрева области резиновой оболочки в изделии сварку установочного кольца с опорным кольцом следует производить электронным лучом мощностью 8 кВт со скоростью 12 мм/с, сварное соединение установочного и опорного колец должно иметь вид, представленный на рис. 4;
- расчетное сварное соединение обеспечивает отсутствие перегрева области резиновой оболочки – максимальная температура в этой области составляет 70°C;
- наиболее нагруженной зоной при эксплуатации изделия является корень сварного шва закрепляющего кольца – напряжение в этой зоне равно 770 МПа, что составляет 86% от прочности материала сварного шва титанового сплава;
- разработанный и реализованный способ закрепления узла резиновой оболочки позволил сократить продолжительность сварки с 40 до 1 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // Редкие земли. 2014. №3. С. 8–13.
2. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение: итоги и перспективы // Вестник Российской академии наук. 2002. Т. 72. №1. С. 3–12.
3. Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России: сб. науч.-информ. матер. М.: ВИАМ, 2013. 543 с.
4. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Сварка и пайка в авиакосмической промышленности // Сб. матер. Всерос. науч.-практич. конф. «Сварка и безопасность». 2012. Т. 1. С. 21–30.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.06.2017).
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–52.
7. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации // Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
8. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 19–36.
9. Лукин В.И., Оспенникова О.Г., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д. Сварка алюминиевых сплавов в авиакосмической промышленности // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 47–52.
10. Сорокин Л.И., Лукин В.И., Багдасаров Ю.С. Оптимизация сварочной ремонтной технологии деталей газотурбинных двигателей (ГТД) из жаропрочных сплавов // Сварочное производство. 1997. С. 19–23.
11. Лукин В.И., Сорокин Л.И., Багдасаров Ю.С. Свариваемость литейных жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС6 // Сварочное производство. 1997. №6. С. 12–17.
12. Лукин В.И., Семенов В.Н., Старова Л.Л. и др. Образование горячих трещин при сварке жаропрочных сплавов // МиТОМ. 2007. №12. С. 7–14.

13. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Сварка плавлением титанового сплава ВТ18У // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №5. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-3-3.
14. Лукин В.И., Вознесенская Н.М., Ковальчук В.Г. Сварка высокопрочной коррозионностойкой стали ВНС-72 // Сварочное производство. 2012. №10. С. 31–35.
15. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
16. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. Л.: Наука, 1992. 400 с.
17. Сварка электронно-лучевая изделий тяжелого машиностроения: РД 24.949.04–90: утв. Минвом тяжелого машиностроения СССР. М: ЦНИИТМАШ, 1990.
18. Гуревич С.М., Замкова В.Н. и др. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / под ред. В.Н. Замкова. Киев: Наук. думка, 1986. 240 с.