

## К вопросу оценки наличия остаточных напряжений на алюминиевых плитах

С.К. Каргапольцев<sup>1а</sup>, В.Е. Гозбенко<sup>2б</sup>, Р.С. Большаков<sup>2с</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

<sup>а</sup> kck6262@mail.ru, <sup>б</sup> vgozbenko@yandex.ru, <sup>с</sup> bolshakov\_rs@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8394-0054>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>

Статья поступила 20.07.2023, принята 20.09.2023

*В качестве объекта исследований рассматривается алюминиевая плита после термической обработки, происходящей неравномерно по всей поверхности образца. Эти особенности технологии производства таких плит формируют на поверхности изделий остаточные напряжения, которые в дальнейшем могут привести к возникновению различных дефектов. Расположение остаточных напряжений в алюминиевых плитах представляет собой эпюру известного вида. Предлагается метод оценки остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов, основанный на традиционных теоретических сведениях и известных экспериментальных методиках. Предполагается, что сжимающие и растягивающие остаточные напряжения в исследуемом образце находятся в равновесном состоянии. Оценивается возможность использования методов неразрушающего контроля при определении наличия остаточных напряжений в рассматриваемом объекте, что необходимо для уменьшения производственных затрат. Наличие внутренних дефектов не проявляется при визуальной оценке алюминиевой плиты и требует проведения исследований с проникновением в поверхностный слой исследуемого образца с использованием рентгенографического метода, который обеспечивает целостность рассматриваемой заготовки. Для определения общей картины распределения напряжения по всему образцу необходимо нахождение начальных точек эпюры остаточных напряжений, положение которых определяется при помощи рентгенографического метода. Эюра остаточных напряжений в данном случае представляет собой параболическую зависимость, имеющую растягивающую и сжимающую составляющие. В этом случае для определения расположения частей эпюры относительно найденных точек поверхности используется математический аппарат на основе интегральных преобразований. Предлагается оценка состояния заготовки с учетом известных положений по форме эпюры остаточных напряжений. Получены аналитические соотношения условия равновесия.*

**Ключевые слова:** остаточные напряжения; алюминиевые сплавы; условие равновесия; неразрушающий контроль.

## On the issue of assessing the presence of residual stresses in aluminum plates

S.K. Kargapoltsev<sup>1а</sup>, V.E. Gozbenko<sup>2б</sup>, R.S. Bolshakov<sup>2с</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

<sup>а</sup> kck6262@mail.ru, <sup>б</sup> vgozbenko@yandex.ru, <sup>с</sup> bolshakov\_rs@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8394-0054>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1187-5932>

Received 20.07.2023, accepted 20.09.2023

*As an object of research, an aluminum plate after heat treatment is considered, which occurs unevenly over the entire surface of the sample. These features of the technology for the production of such plates form residual stresses on the surface of the products, which in the future can lead to various defects. The location of residual stresses in aluminum plates is a diagram of a known type. A method is proposed for estimating residual stresses in billets made of aluminum alloys, based on traditional theoretical information and well-known experimental techniques. It is assumed that the compressive and tensile residual stresses in the test sample are in equilibrium. The possibility of using non-destructive testing methods to determine the presence of residual stresses in the object under consideration is evaluated, which is necessary to reduce production costs. The presence of internal defects does not appear in the visual assessment of the aluminum plate, which requires studies with penetration into the surface layer of the test sample using an X-ray method that ensures the integrity of the workpiece in question. To determine the overall pattern of stress distribution throughout the sample, it is necessary to find the initial points of the residual stress diagram, the position of which is determined using the X-ray method. The diagram of residual stresses in this case is a parabolic dependence, which has tensile and shrinking components. In this case, to determine the location of the plot parts relative to the found points of the surface, a mathematical apparatus based on integral transformations is used. Taking into account the known positions in the form of the diagram of residual stresses, an assessment of the state of the workpiece is proposed. Analytical relations of the equilibrium condition are obtained.*

**Key words:** residual stresses; aluminum alloys; equilibrium condition; non-destructive testing.

**Введение.** В настоящее время требуется повышенное внимание к производству отечественных технологических и транспортных машин, функционирование которых должно быть связано с минимизацией потребляемого сырья и возможностями длительной безаварийной работы.

Современные машиностроительные производства достаточно разнообразны и связаны с изготовлением деталей машин из большого количества различных металлов и их сочетаний, что требует соблюдения технологических режимов обработки исходного материала, имеющего различные физические свойства, учет которых на каждом этапе изготовления изделия должен оцениваться и контролироваться при производстве каждой заготовки.

При следовании многократно апробированной технологии возникает ряд условий, влияющих на качество конечного продукта. К ним можно отнести получение необходимой геометрии деталей, формирование нужной структуры поверхностных слоев, выдерживание требуемых температурных режимов и др. Подходы в решении такого рода задач нашли отражение в [1–7].

Вопросы обработки металлов и сплавов для получения необходимых свойств конечных материалов достаточно проработаны. Изготовление изделий из различных сплавов сопровождается возникновением дефектов, проявляющихся при температурных и механических воздействиях [8–14]. К таким факторам могут быть отнесены поверхностные остаточные напряжения, появляющиеся после закалочных технологических процедур по модификации свойств материалов [15–20] и имеющие значения, способные превышать величину внешних воздействий на изделия, что нередко провоцирует изменение заявленной формы деталей.

Для определения этих напряжений применяются методы, связанные с разрушающим контролем полученных образцов, что не всегда приемлемо, так как предполагает повреждение исследуемого образца. В связи с этим возникает необходимость в создании способов неразрушающего контроля рассматриваемых заготовок, применение которых, в свою очередь, показывает не всегда точные результаты, варьируемые в зависимости от применяемой технологии, так как каждый подход позволяет найти участок напряжения на различной глубине.

Применение неразрушающего контроля позволяет уменьшить финансовые и временные расходы, связанные с тем, что большинство методов оценки остаточных напряжений предполагает разрушение выбранного для исследования образца материала [15], что инициирует необходимость поиска и разработки подходов, позволяющих оценивать наличие остаточных напряжений без механических повреждений обследуемых заготовок. К ним можно отнести рентгенографический метод, позволяющий определять наличие остаточных напряжений на поверхности рассматриваемого образца, однако для его реализации необходимо наличие достаточно массивного и дорогостоящего оборудования, которое также является малоподвижным, что в некоторых случаях делает его неудобным при проведении исследований.

В этом направлении можно выделить применение АФЧХ-тестирования, основанного на использовании

скин-эффекта для оценки наличия остаточных напряжений в исследуемой заготовке. Такой метод также позволяет без разрушения образца обнаружить остаточные напряжения. В этом случае используется достаточно компактное оборудование, которое позволяет определять наличие напряжений с некоторыми ограничениями по глубине исследования.

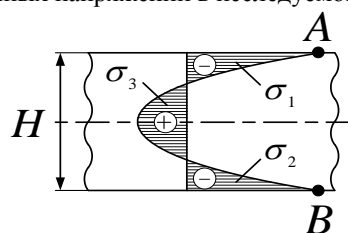
Несмотря на наличие большого количества исследований и разработок по данной проблематике, некоторые вопросы требуют дальнейшего рассмотрения. В частности, актуальной является задача по разработке экспресс-методов по неразрушающему определению остаточных напряжений. Такие методы требуют мало времени на реализацию и должны быть достаточно точными и информативными.

В предлагаемой статье рассматриваются вопросы определения поверхностных остаточных напряжений в алюминиевых заготовках при использовании неразрушающего контроля.

**Объекты исследований.** Рассматриваются вопросы оценки остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов, подверженных при технологических температурных воздействиях образованию поверхностных остаточных напряжений, учет которых необходим при дальнейшем использовании заготовки.

Для развития подходов, связанных с определением поверхностных остаточных напряжений, необходимо совместное использование методов неразрушающего контроля и известных положений об их расположении в рассматриваемом образце, что необходимо для формирования общей картины распределения напряжений в исследуемой заготовке с последующей выработкой рекомендаций по их устранению.

Как теоретические, так и экспериментальные исследования остаточных напряжений, возникающих при закалке, показывают, что характер их распределения с высокой точностью можно аппроксимировать параболической зависимостью [5], как показано на рис. 1, где приведена принципиальная схема распределения поверхностных остаточных напряжений в исследуемом образце.



**Рис. 1.** Принципиальная схема распределения остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов

На рис. 1 представлены области с отрицательными остаточными напряжениями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , представляющими собой сжатие, области с положительным остаточным напряжением  $\sigma_3$  (растяжение), ось симметрии, а также толщина образца, обозначенная через  $H$ . Области напряжений проиллюстрированы заштрихованными участками. В данном случае представлены растягивающие и сжимающие напряжения в предположении, что представленные напряжения уравниваются друг друга. Растягивающие напряжения обозначены знаком « $\leftarrow$ », а сжимающие — знаком « $\rightarrow$ ».

Для удобства проведения дальнейших исследований примем, что ось симметрии совпадает с центральной осью исследуемой алюминиевой плиты. Так как поверхность образца, согласно технологии производства, должна быть ровной, можно предположить, что положительное  $\sigma_3$  и отрицательные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2$  уравниваются между собой. Уравнение равенства в этом случае можно записать в виде:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_3. \quad (1)$$

Соотнесение эпюры остаточных напряжений с заявленной принципиальной схемой требует определения мест расположения точек ее начала на поверхности алюминиевой плиты, что подразумевает использование методов определения остаточных напряжений. К ним могут быть отнесены наиболее распространенные механические методы, подразумевающие разрушение исследуемого образца, рентгенографический метод и метод АФЧХ-тестирования, относящиеся к разрушающему контролю.

Для корректного определения наличия остаточных напряжений необходимо найти две точки начала эпюры, представляющей собой параболу (тт.  $A$  и  $B$ ). После чего может быть использован соответствующий математический аппарат для определения остальных частей эпюры, в том числе с использованием площадей напряжений согласно эпюре. В это случае выражение примет вид:

$$S_{\sigma_1} + S_{\sigma_2} = S_{\sigma_3}. \quad (2)$$

Таким образом, для определения остаточных напряжений в прокате из алюминиевых сплавов производится выбор метода исследования, например, рентгенографический, далее калибруется используемый для исследований прибор на выбранный тип металла или сплава, выбранный прибор наводится в виде источника сфокусированного рентгеновского излучения (коллиматор, являющийся одним из основных элементов лабораторных комплексов, использующих рентгеновский метод) на исследуемую алюминиевую плиту, находят необходимые точки ( $A$  и  $B$ ) напряжения вдоль края образца, так более подверженных образованию остаточных напряжений с обеих сторон, что это позволяет определить общий вид эпюры в соответствии с теоретическими положениями [5].

Поэтапное проведение действий по приведенному выше алгоритму, а также наличие условия равновесия позволяет перейти к определению общих остаточных напряжений [15], распределенных по параболическому закону, использование которого позволяет применять математический аппарат, основанный на интегральных преобразованиях.

Решение задачи достигается тем, что образец исследуют при помощи известных методов неразрушающего определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов, например, при помощи рентгенографического метода, который из-за достаточной проникающей способности больше всего подходит для решения поставленной задачи.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять наличие поверхностных остаточных напря-

жений с эпюрой сложной формы в образцах после прокатки без механических повреждений исследуемого образца.

**Материалы и методы исследований.** После определения двух точек ( $A, B$ ), необходимых для построения эпюры поверхностных остаточных напряжений, распределенной по параболическому закону [5] (рис. 1), и при условии симметричного расположения этих точек схематичное расположение распределений площадей положительных и отрицательных напряжений с учетом дополнительных параметров можно представить в виде, приведенном на рис. 2, где проиллюстрирована детализированная расчетная схема, предназначенная для построения соотношений между площадями растягивающих и сжимающих напряжений.

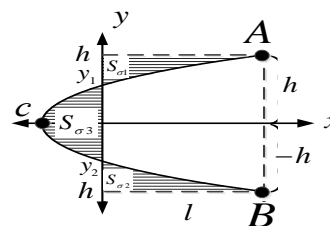


Рис. 2. Расчетная схема определения площадей положительных и отрицательных остаточных напряжений

На рис. 2 представлены площади остаточных напряжений:  $S_{\sigma_1}, S_{\sigma_2}$  — площади распределения отрицательных напряжений;  $S_{\sigma_3}$  — площадь распределения положительных напряжений. Отрицательные напряжения в этом случае полагаются растягивающими, а положительные — сжимающими. Для удобства при проведении дальнейших математических выкладок, основанных на использовании выражений на базе параболической зависимости и интегральных преобразованиях, необходимо перейти к разделению области сжатия на две части, обозначив их как  $S_{\sigma_{31}}$  и  $S_{\sigma_{32}}$ , что позволит уравновесить полученные области с имеющимися областями растягивающих напряжений. Детализированная схема приведена на рис. 3.

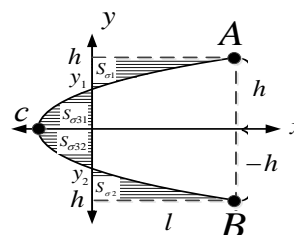


Рис. 3. Детализированная расчетная схема определения площадей положительных и отрицательных остаточных напряжений, сформированная на основе рис. 2

На данной схеме представлены следующие обозначения:  $l$  — расстояние от полученных экспериментальным путем точек начала эпюры остаточных напряжений до пересечения кривой параболы с осью  $Oy$ , разграничивающей площади растягивающей и сжимающей составляющих напряжений;  $h, -h$  — расстояния от точек  $A$  и  $B$  до оси  $Ox$ ;  $c$  — вершина параболы;  $S_{\sigma_1}, S_{\sigma_2}$  — площади распределения отрицательных (растягивающих)

напряжений;  $S_{\sigma 31}$ ,  $S_{\sigma 32}$  — положительных (сжимающих) напряжений. Область распределения положительных остаточных напряжений разделяется на две части для удобства формирования общего равенства, необходимого для применения интегральных преобразований.

Выражение равенства площадей в этом случае трансформируется следующим образом:

$$S_{\sigma 1} + S_{\sigma 2} = S_{\sigma 3} + S_{\sigma 4}. \quad (3)$$

Для дальнейших выкладок необходимо использовать классическое уравнение параболы, так как площади остаточных напряжений соотносятся друг с другом через пропорции, ограниченные кривой параболы [5]. Такой подход позволяет применять все основные выкладки, связанные с параболическими зависимостями, а также корректно привязаться к площадям частей эпюры напряжений для дальнейшего использования интегральных преобразований, позволяющих определить соотношения между обозначенными областями.

Использование канонического уравнения параболы в данном случае оправданно, так как является симметричной осью абсцисс, что необходимо при проведении математических расчетов [21], направленных на установление соответствия между заявленными площадями растягивающих и сжимающих напряжений.

Исходя из вышеперечисленного, уравнение параболы можно записать в виде:

$$x = ay^2 - c, \quad (4)$$

где  $a$  — координата вершины параболы;  $c$  — вершина параболы. В этом случае  $a > 0, c > 0$ .

Для дальнейших выкладок при  $y = 0, x = -c$  необходимо обозначить следующие соотношения:

$$y = h, x = l, c = ay^2 - x, \quad (5)$$

$$x = 0 \Rightarrow ay^2 - c = 0, y_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{c}{a}}.$$

Интегральные преобразования для решения данного вида задач целесообразно применять с учетом гипотезы равенства площадей выделенных областей. В этом случае использование представленной параболической зависимости является адекватным.

Так как исследуемая плита симметрична относительно центральной оси, которая также совпадает с осью  $x$ , эпюру можно разделить на две равные части.

Тогда, с учетом условия симметрии, получим следующее выражение:

$$S_{\sigma 2} = S_{\sigma 31}. \quad (6)$$

Для дальнейших выкладок используем выражение для нахождения определенных интегралов. В этом случае уравнение для определения площади растягивающей области  $S_{\sigma 2}$  примет вид:

$$S_{\sigma 2} = \int_{y_2}^h (ay^2 - c)dy = a \frac{y^3}{3} \Big|_{y_2}^h - cy \Big|_{y_2}^h. \quad (7)$$

После проведения интегральных преобразований получим:

$$S_{\sigma 2} = a \frac{y^3}{3} \Big|_{y_2}^h - cy \Big|_{y_2}^h. \quad (8)$$

Выражение (8) может быть трансформировано к виду:

$$S_{\sigma 2} = \frac{a}{3}(h^3 - y_2^3) - c(h - y_2). \quad (9)$$

После проведения всех преобразований конечное выражение примет следующую форму:

$$S_{\sigma 2} = \frac{a}{3}h^3 - ch - \frac{a}{3}\left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{3}{2}} + c\left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (10)$$

В окончательном виде (10) преобразуется следующим образом:

$$S_{\sigma 2} = h\left(\frac{a}{3}h^2 - c\right) + \frac{2}{3}c\left(\frac{c}{a}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

что может быть использовано в дальнейшем для реализации предположения о равенстве площадей растягивающих и сжимающих областей.

Следующим этапом расчетов является определение части площади сжимающего сегмента эпюры остаточных напряжений. Выражение для определения площади  $S_{\sigma 4}$  запишем в виде:

$$S_{\sigma 4} = - \int_0^{y_2} (ay^2 - c)dy. \quad (12)$$

После применения интегральных преобразований получим:

$$-S_{\sigma 4} = \left(\frac{a}{3}y^3 - cy\right) \Big|_0^{y_2}. \quad (13)$$

Проведение трансформации выражения (13) позволяет привести его к следующему виду:

$$-S_{\sigma 4} = \sqrt{\frac{c}{a}}\left(\frac{c}{3} - c\right). \quad (14)$$

В конечном итоге получим:

$$-S_{\sigma 4} = -\frac{2}{3}\left(\sqrt{\frac{c^3}{a}}\right), \quad (15)$$

что позволяет сделать вывод о корректности выбранных теоретических положений о виде эпюры остаточных напряжений, послуживших основой для полученных математических выкладок.

При использовании предположения о равенстве площадей после трансформации далее получим выражение в следующем виде:

$$S_{\sigma 2} = S_{\sigma 4} \Rightarrow h\left(\frac{a}{3}h^2 - c\right) + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{c^3}{a}}. \quad (16)$$

Итоговый результат при учете  $h\left(\frac{a}{3}h^2 - c\right) = 0$  обозначен выражением:

$$S_{\sigma 2} = S_{\sigma 4} = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{c^3}{a}}. \quad (17)$$

Определение  $S_{\sigma 1}$  и  $S_{\sigma 3}$  связано с проведением аналогичных выкладок, что подтверждается условием симметрии.

**Результаты исследований.** Проведение дальнейших выкладок связано с использованием полученных выражений и направлено на получение детализированной информации о геометрических параметрах расчетной схемы в виде параболической зависимости с целью дальнейшего развития предлагаемого подхода, который при помощи использования методов неразрушающего контроля и информации о виде эпюры поверхностных остаточных напряжений позволяет получить данные об их расположении в исследуемом образце при нахождении двух верхних точек параболы, близких к поверхности. Эти точки могут быть найдены при помощи неразрушающего определения путем обследования поверхности заготовки.

Параметр  $c$  в этом случае может быть найден при помощи выражения (17):

$$c = \frac{h^2 a}{3}. \quad (18)$$

После подстановки в каноническое уравнение параболы (4) найдем:

$$x = ay^2 - \frac{h^2 a}{3}. \quad (19)$$

Так как  $y = h$ , выражение трансформируется к следующему виду:

$$x = a(h^2 - \frac{h^2}{3}) = \frac{2}{3} ah^2. \quad (20)$$

Если  $y = h$ , то при  $x = l$  получим:

$$l = \frac{2}{3} ah^2. \quad (21)$$

Из выражения (21) можно определить значение параметра  $a$ :

$$a = \frac{3}{2} \frac{l}{h^2}. \quad (22)$$

В случае, когда  $y = 0$ ,  $x = -c$ , после подстановки (22) в выражение (18) получим:

$$c = \frac{h^2 a}{3} = \frac{l}{2}. \quad (23)$$

Таким образом, в окончательном варианте один из геометрических параметров определится:

$$c = \frac{l}{2}. \quad (24)$$

Как уже говорилось ранее, формирование общей картины напряжений, т. е. для построения кривой параболы, при  $y = h$  необходимо наличие двух точек ( $A$  и  $B$ ). Выражение в этом случае будет иметь следующий вид:

$$x = y^2, \quad (25)$$

где  $y$  — расстояние от рассматриваемой точки до оси симметрии.

Условие равенства площадей распределения остаточных напряжений и выражение (17) после подстановки позволяют найти дополнительные соотношения для построения кривой параболы:

$$c = \frac{1}{3} y, \quad (26)$$

$$l = \frac{3}{2} y, \quad (27)$$

$$a = \frac{c + y}{x^2}. \quad (28)$$

При использовании параметра  $h$  в окончательном виде получим:

$$c = \frac{1}{3} y, l = \frac{3}{2} y, a = \frac{c + y}{h^2}. \quad (29)$$

Наличие условия равновесия позволяет перейти к определению общих остаточных напряжений [5], распределенных по параболическому закону:

$$\sigma = \sigma_n \left( \frac{6}{H^2} y_n^2 - \frac{6}{H} y_n + 1 \right), \quad (28)$$

где  $\sigma_n$  — остаточное напряжение на поверхности, МПа;  $H$  — толщина образца, мм,  $y_n$  — расстояние от рассматриваемой точки до поверхности пластины, мм.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет определять наличие поверхностных остаточных напряжений с эпюрой сложной формы в алюминиевых плитах после прокатки без механических повреждений исследуемого образца.

Для исследования выбран образец из алюминиевого сплава В95Т толщиной 100 мм. Остаточное напряжение на поверхности  $\sigma_n$ , найденное рентгенографическим методом, составило 200 Мпа. Расстояние от рассматриваемой точки  $y$  составит 50 мкм = 0,05 мм. В этом случае значение общего остаточного напряжения составит:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_n \left( \frac{6}{H^2} y^2 - \frac{6}{H} y + 1 \right) = \\ &= 200 \left( \frac{6}{100^2} 0,05^2 - \frac{6}{100} 0,05 + 1 \right) = 199,4 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

**Заключение.** Таким образом, подходы, основанные на неразрушающем контроле изделий из алюминиевых сплавов, позволяют достаточно точно определить наличие остаточных напряжений в исследуемом образце. При соблюдении условия равновесия напряжений в заготовке внутренние дефекты можно оценить с помощью таких методов с сохранением целостности образца. Наличие информации о форме эпюры остаточных напряжений позволяет определять ее геометрию по двум точкам, нахождение которых осуществляется при помощи неразрушающих подходов, к примеру, рентгенографическим методом. Предложен комплексный метод оценки поверхностных остаточных напряжений, основанный на использовании известных теоретических положений и апробированных экспериментальных подходов. Показана технология определения дополнительных геометрических параметров эпюры остаточных напряжений на базе интегрального математического аппарата. Приведен пример расчета.

## Литература

1. Бондаренко, Ю. А. Технология изготовления деталей на станках с ЧПУ / Ю. А. Бондаренко, А. А. Погонин, А. Г. Схиртладзе, М. А. Федоренко. — Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2011. — 292 с.
2. Волчкевич, Л. И. Автоматизация производственных процессов / Л. И. Волчкевич. — М.: Машиностроение, 2005. — 379.
3. Тайц, В. Г. Технология машиностроения и производство подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин / В. Г. Тайц, В. И. Гуляев. — М.: Академия, 2007. — 368 с.
4. Житников, Ю. З. Методика разработки кинематических схем устройств автоматизированной сборки изделий на основе структурных схем управления процессом / Ю. З. Житников, Б. Ю. Житников, А. Е. Матросов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2020. — № 2. — С. 91-95.
5. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: МАШГИЗ, 1963. — 233 с.
6. Промптов, А. И. Формирование общих подходов к управлению качеством поверхности при механической обработке / А. И. Промптов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2005. — № 2(22). — С. 98-101.
7. Каргапольцев, С. К. Остаточные деформации при фрезеровании маложестких деталей с подкреплением / С. К. Каргапольцев ; Научный редактор А.И. Промптов. — Иркутск: Иркутский Дом печати, 1999. — 136 с.
8. Шастин, В. И. Лазерная модификация поверхностей трибологических сопряжений / В. И. Шастин, С. К. Каргапольцев // Вестник машиностроения. — 2017. — № 6. — С. 50-53.
9. Компьютерное моделирование распределения температуры на поверхности формы и внутри отливки при высокоградиентной направленной кристаллизации / Ю. А. Бондаренко, А. Б. Ечин, В. Е. Баженов, А. В. Колтыгин // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. — 2017. — № 4. — С. 53-61. — DOI 10.17073/0021-3438-2017-4-53-61.
10. Каргапольцев, С. К. Повышение прочности фрезерования сложнопрофильных деталей путем рационального проектирования схем их базирования / С. К. Каргапольцев, О. М. Кустов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2004. — № 3. — С. 39-44.
11. Zhongxu X., Changpeng C. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V // Materials & Design. 2020. Vol. 193. Art. 108846. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108846.
12. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. No. 35. P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.
13. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier Science, 2001. Section 5a. P. 8152–8158. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01462-5.
14. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. No. 1. P. 1–186. DOI: 10.2200/S00818ED1V01Y201712SEM001.
15. Ботвенко, С. И. Пространственное распределение термических остаточных напряжений в пластине / С. И. Ботвенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2013. — № 12(83). — С. 44-53.
16. Ботвенко С.И. «Способ определения остаточных закалочных напряжений», 2494359, МПК G01L1/00, приоритет 10.02.2012
17. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // Procedia CIRP. 2016. Vol. 45. P. 203–206. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.256.
18. Ghasemi A.R., Shokrieh M.M. Measuring residual stresses in composite materials using the simulated hole-drilling method // Residual Stresses in Composite Materials. Woodhead Publishing, 2014. P. 76–120. DOI: 10.1533/9780857098597.1.76.
19. Hill M.R. The Slitting Method // Practical Residual Stress Measurement Methods. Vancouver: University of British Columbia, 2013. P. 89–108. DOI: 10.1002/9781118402832.ch4.
20. Cheng W., Finnie I. Residual Stress Measurement and the Slitting Method. New York: Springer, 2007. 164 p.
21. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука. 1977. — 872 с.

## References

1. Bondarenko, Yu. A. Technology of manufacturing parts on CNC machines / Yu. A. Bondarenko, A. A. Pogonin, A. G. Skhirtladze, M. A. Fedorenko. - Stary Oskol: TNT LLC, 2011. - 292 p.
2. Volchkevich, L. I. Automation of production processes / L. I. Volchkevich. - M.: Mashinostroenie, 2005. - 379.
3. Taits, V. G. Technology of mechanical engineering and production of hoisting-and-transport, construction and road machines / V. G. Taits, V. I. Gulyaev. — M.: Academy, 2007. — 368 p.
4. Zhitnikov, Yu. 3. Automation of production processes in mechanical engineering / Yu. 3. Zhitnikov, B. Yu. Zhitnikov, A. G. Skhirtladze - Stary Oskol: TNT LLC, 2011. - 656 p.
5. Birger I.A. Residual stresses. M.: MASHGIZ, 1963. - 233 p.
6. Promptov, A. I. Formation of general approaches to surface quality control during machining / A. I. Promptov // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. - 2005. - No. 2 (22). - S. 98-101.
7. Kargapol'tsev, S. K. Residual deformations during milling of low-rigid parts with reinforcement / S. K. Kargapol'tsev; Scientific editor A.I. Prompts. - Irkutsk: Irkutsk Press House, 1999. - 136 p.
8. Shastin, V. I. Laser modification of surfaces of tribological interfaces / V. I. Shastin, S. K. Kargapol'tsev // Vestnik mashinostroeniya. - 2017. - No. 6. - P. 50-53.
9. Bondarenko Yu. A., Echin A. B., Bazhenov V. E., Kolygin A. V. Computer simulation of temperature distribution on the mold surface and inside the casting during high-gradient directional crystallization. Non-ferrous metallurgy. - 2017. - No. 4. - P. 53-61. — DOI 10.17073/0021-3438-2017-4-53-61.
8. Kargapol'tsev, S.K. Residual deformations during milling of low-rigid parts with reinforcement / S.K. Kargapol'tsev; Scientific editor A.I. Prompts. - Irkutsk: Irkutsk Press House, 1999. - 136 p.
9. Bondarenko, Yu. A. Manufacturing technology of machine parts [Text]: textbook / Yu. A. Bondarenko, M. A. Fedorenko. - Belgorod: BSTU im. V. G. Shukhova, 2005. - 121 p.
10. Kargapol'tsev, S.K., Kustov, O.M., Increasing the strength of milling complex profile parts by rational design of their basing schemes. Sovremennye tekhnologii. System analysis. Modeling. - 2004. - No. 3. - S. 39-44.
11. Zhongxu X., Changpeng C. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V // Materials & Design. 2020. Vol. 193. Art. 108846. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108846.
12. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. No. 35. P. 572–588. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.08.022.
13. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier Science, 2001. Section 5a. P. 8152–8158. DOI: 10.1016/B0-08-043152-6/01462-5.
14. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. No. 1. P. 1–186. DOI: 10.2200/S00818ED1V01Y201712SEM001.
15. Botvenko, S. I. Spatial distribution of thermal residual stresses in a plate / S. I. Botvenko // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. - 2013. - No. 12(83). - S. 44-53.
16. Botvenko S.I. "Method for determining residual hardening stresses", 2494359, IPC G01L1 / 00, priority 10.02.2012

17. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 45. P. 203–206. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.256.

18. Ghasemi A.R., Shokrieh M.M. Measuring residual stresses in composite materials using the simulated hole-drilling method // *Residual Stresses in Composite Materials*. Woodhead Publishing, 2014. P. 76–120. DOI: 10.1533/9780857098597.1.76.

19. Hill M.R. The Slitting Method // *Practical Residual Stress Measurement Methods*. Vancouver: University of British Columbia, 2013. P. 89–108. DOI: 10.1002/9781118402832.ch4.

20. Cheng W., Finnie I. *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*. New York: Springer, 2007. 164 p.

21. Vygodsky M.Ya. *Handbook of higher mathematics*. M.: Science. 1977. – 872 p.