

## Способы определения термических остаточных напряжений в заготовках типа плит из алюминиевых сплавов

С.К. Каргапольцев<sup>1а</sup>, А.К. Мозалевская<sup>2б</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> mozalevskay@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0590-176X>

Статья поступила 09.11.2023, принята 17.11.2023

*Рассматривается современное состояние научных разработок в направлении определения термических остаточных напряжений в алюминиевых плитах после проведения термической обработки. Основными направлениями определения остаточных напряжений являются методы разрушающего и неразрушающего контроля. Использование разрушающих методов контроля приводит к большим затратам, связанным с их проведением. В связи с этим в настоящее время является актуальной задачей разработка неразрушающих методов определения остаточных напряжений, которые позволяют сохранить исследуемый образец для дальнейшего использования. Неразрушающие методы позволяют сохранить исследуемый образец в первоначальном виде и основаны на использовании физических явлений. Одним из таких методов является использование скин-эффекта для определения термических остаточных напряжений, что позволяет без разрушения образца определить наличие дефектов поверхности с применением устройств небольших габаритов. Рентгенографический метод является распространенным способом неразрушающего контроля и связан с использованием рентгеновского излучения, позволяющего достаточно точно определить наличие остаточных напряжений. Применение существующих способов позволяет достаточно точно определять наличие напряжений, однако дальнейшие механические воздействия, необходимые для нейтрализации вредных воздействий остаточных напряжений, могут изменить общую картину их распределения. Эпюра остаточных напряжений располагается в исследуемой заготовке в виде параболы, что согласуется с известными теоретическими положениями. Несмотря на проведение большого объема научных исследований в рассматриваемой области, одной из проблем остается точность при определении остаточных напряжений.*

**Ключевые слова:** способ определения; термические остаточные напряжения; алюминиевые плиты; неразрушающий контроль.

## Methods for determining thermal residual stresses in blanks such as plates made of aluminum alloys

S.K. Kargapoltsev<sup>1а</sup>, A.K. Mozalevskaya<sup>2б</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> mozalevskay@mail.ru

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4601-3099>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0590-176X>

Received 09.11.2023, accepted 17.11.2023

*The current state of scientific developments in the direction of determining thermal residual stresses in aluminum plates after heat treatment is considered. The main directions for determining residual stresses are methods of destructive and non-destructive testing. The use of destructive testing methods leads to high costs associated with their implementation. In this regard, it is currently an urgent task to develop non-destructive methods for determining residual stresses, which make it possible to preserve the sample under study for further use. Non-destructive methods make it possible to preserve the sample under study in its original form and are based on the use of physical phenomena. One of these methods is the use of the skin effect to determine thermal residual stresses, which allows determining the presence of surface defects without destroying the sample using small-sized devices. The X-ray method is a common method of non-destructive testing and is associated with the use of X-ray radiation, which allows one to sufficiently determine the presence of residual stresses. The use of existing methods makes it possible to quite accurately determine the presence of stresses, however, further mechanical effects necessary to neutralize the harmful effects of residual stresses can change the overall picture of their distribution. The diagram of residual stresses is located in the workpiece under study in the form of a parabola, which is consistent with known theoretical principles. Despite a large amount of scientific research in this area, one of the problems remains the accuracy in determining residual stresses.*

**Keywords:** method of determination; thermal residual stresses; aluminum plates; non-destructive testing.

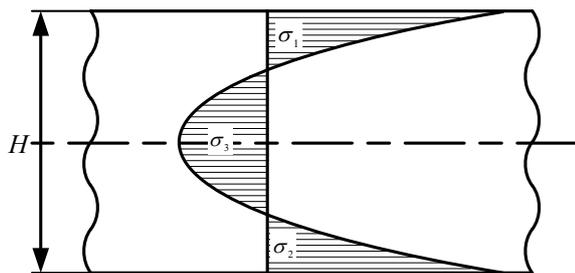
**Введение.** Проблема остаточных напряжений является одной из важнейших для обеспечения надежности и долговечности машин и механизмов. Остаточные напряжения возникают в деталях при реализации технологических операций и приводят к возникновению деформаций (изменение размеров деталей, коробление, образование трещин, брак и снижение качества деталей), а по своей величине могут превосходить напряжения от внешней нагрузки [1–5]. Причиной возникновения остаточных напряжений является пластическая деформация металла в процессе обработки. В машиностроении сжимающие остаточные напряжения в некоторых случаях полезны и создаются специально с помощью различных технологических процессов, тем самым увеличивая поверхностную прочность и коррозионную стойкость [6–11].

При производстве авиационных деталей, особенно малой жесткости, проявляются негативные влияния остаточных напряжений, такие как коробление, возникновение остаточных деформаций [12–16], что является основной причиной браков, а также сказывается на эксплуатационных свойствах деталей, что особенно важно для деталей газотурбинных двигателей. Также важны остаточные напряжения в технологиях восстановления деталей машин и механизмов, для обеспечения высокого действительного ресурса восстановленных деталей [17–22].

В предлагаемой статье рассматривается современное состояние в области определения термических остаточных напряжений в алюминиевых плитах и пути создания неразрушающих методов их контроля.

**I. Общие положения.** Необходимость контроля качества продукции машиностроительных производств обуславливает на различных стадиях технологического процесса изготовления деталей проведение исследований по формированию подходов, связанных с определением остаточных напряжений. Разнообразие таких способов позволяет под каждый конкретный случай подбирать подходящее диагностическое решение.

В научной литературе подавляющее большинство авторов сходятся во мнении об общей картине распределения остаточных напряжений в алюминиевых плитах. Аппроксимация распределения остаточных напряжений в исследуемый заготовке с высокой точностью показывает параболический вид их расположения [2]. На рис. 1 приведена типовая схема распределения остаточных напряжений в заготовке из алюминиевых сплавов.



**Рис. 1.** Схема распределения остаточных напряжений в алюминиевых плитах

Растягивающие напряжения представлены обозначениями  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , область сжимающих напряжений —  $\sigma_3$ . Исследуемая алюминиевая плита считается симметричной относительно центральной оси. Заштрихованные зоны обозначают места наличия напряжений. Высота образца обозначена  $H$ . Представленный случай распределения остаточных напряжений предполагает, что растягивающие и сжимающие компоненты находятся в равновесии между собой.

*Целью исследования* является оценка возможностей расширения существующих способов определения остаточных напряжений.

**II. Основные способы определения остаточных напряжений.** Способы определения остаточных напряжений, основанные на механических воздействиях на обследуемые детали, дают возможность идентификации наличия напряжений в деталях сложной формы, т. е. в таких, как турбинные лопатки, резьбовые соединения, детали в форме дисков и т. д.

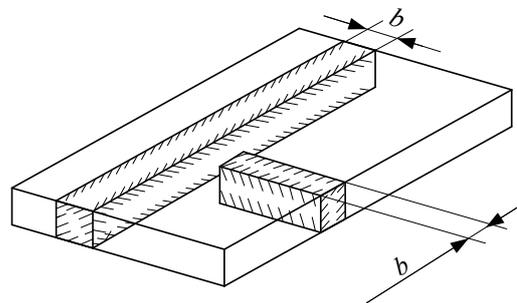
Одним из основных направлений в этой области является применение разрушающих методов оценки полученных алюминиевых плит. Данные подходы основаны на приложении механического воздействия к исследуемой заготовке для определения величины напряжений.

Существующие способы определения остаточных напряжений в деталях из алюминиевых сплавов позволяют оценивать общую картину расположения напряжений в обследуемом образце. Однако появление новых деталей сложной формы с измененными размерами инициирует поиск и разработку способов и средств более точного определения остаточных напряжений. В таких подходах основное внимание уделяется различным вариантам снятия верхних слоев металла в местах напряжений. Также в этом направлении решаются задачи оценки деформации изделий и уточняются формулы определения остаточных напряжений [23].

Распространение получили и механические способы определения остаточных напряжений, основанные на снятии напряженных слоев металла при помощи электролитического и химического травления с использованием автоматизированной метрологической системы.

Известны методы, связанные с нанесением на цилиндрический образец с напылением нескольких радиальных разрезов на глубину толщины сечения покрытия, статическим вдавливанием пирамидального наконечника до образования отпечатка с развивающимися от его вершин хрупкими трещинами, нагреванием поверхности непрерывным потоком излучения, воздействием различных образцов специальной формы с дальнейшей фиксацией деформации [24].

Наличие остаточных напряжений в обследуемом образце может быть оценено при помощи отрезания его частей. При выводе формул для определения остаточных напряжений в пластинках методом полосок используется допущение о постоянстве по ширине дополнительных напряжений в полоске [2]. Это допущение справедливо при малой ширине полоски и плавном изменении остаточных напряжений по толщине пластинки. Однако эти условия далеко не всегда выполняются. Например, остаточные напряжения, возникающие после механической обработки, локализованы в тонком слое у поверхности детали (рис. 2).



**Рис. 2.** Расчетная схема определения остаточных напряжений методом полосок. *Источник:* [2]

Используемый при этом математический аппарат применим при любом законе изменения остаточных напряжений по толщине пластинки и любой ширине полоски. Полученный результат остается справедливым при определении остаточных напряжений через перемещения полоски при снятии слоев.

Следует отметить, что в последнее время широкое распространение получили методы определения остаточных напряжений без разрушения исследуемого образца, позволяющие сократить материальные потери, связанные с изготовлением и обслуживанием специального оборудования для проведения испытаний выбранных изделий, затраты времени на их осуществление, анализ результатов и т. д.

К таким способам можно отнести использование рентгеновского излучения [26] для определения остаточных напряжений с применением специальной исследовательской установки. Данный подход позволяет определить наличие напряжений на достаточно большой глубине за счет оценки изменения параметров кристаллической решетки материала с приемлемой точностью для дальнейшего составления общей картины напряжений.

Как уже отмечалось выше, рентгенографический метод позволяет 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 (рис. 3).



**Рис. 3.** Общий вид экспериментальной установки для определения остаточных напряжений рентгеновским методом. *Источник: [27]*

Однако использование рентгенографического метода позволяет получать информацию о напряжениях II и III рода. Некоторые сложности возникают при определении остаточных напряжений I рода.

В последние годы распространение получили подходы, основанные на использовании скин-эффекта, реализуемого за счет пропускания электрического тока переменной частоты через исследуемый участок поверхности. Применяемые алгоритмы позволяют по измеренным электрическим величинам определять значения средних напряжений в каждом слое с последующим пересчетом в интеграл напряжений и действительные напряжения.

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 при помощи физических эффектов взаимодействия электрического тока с поверхностью алюминиевой плиты. В этом случае используется достаточно компактное оборудование, которое позволяет определять наличие напряжений с некоторыми ограничениями по глубине исследования [28].

На рис. 4 приведен общий вид диагностического блока аппаратуры «Ситон-тест» 8.1, предназначенного для определения остаточных напряжений методом АФЧХ-тестирования.



**Рис. 4.** Общий вид диагностического блока оборудования «Ситон-тест» 8.1. *Источник: [29]*

Аппаратура, используемая для проведения АФЧХ-тестирования, калибруется при помощи рентгеновских и механических неразрушающих методов.

Для развития подходов, связанных с определением 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.

Несмотря на наличие большого количества исследований и разработок по данной проблематике, некоторые вопросы требуют дальнейшего рассмотрения. В частности, актуальным является направление по разработке способов и средств ускоренной реализации методов неразрушающего определения остаточных напряжений в алюминиевых плитах. Такие методы требуют меньше времени на реализацию и должны быть достаточно точными и информативными [30].

Данный подход основан на гипотезе о равенстве площадей остаточных напряжений растягивающего и сжимающего характера. В качестве расчетной схемы для оценки особенностей такой постановки задачи может быть использована традиционная схема распределения напряжений (рис. 1).

При условии, что поверхность алюминиевой плиты является ровной, растягивающие и сжимающие компоненты напряжений предполагаются уравнивающимися друг друга при совпадении центральной оси исследуемого образца с его осью симметрии. Выражение для условия равновесия имеет вид:

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

Согласно традиционным теоретическим положениям о виде распределения остаточных напряжений в алюминиевых плитах, эпюра представляет собой параболическую зависимость, для определения расположения которой в исследуемом образце с учетом условия симметрии необходимо обнаружить две точки начала кривой параболы. Нахождение необходимых точек связано с использованием неразрушающих способов [28].

После определения области расположения параболы в алюминиевой плите необходимо использовать условие равенства напряжений. Площади остаточных напряжений обозначены через  $S_{\sigma_1}$ ,  $S_{\sigma_2}$  — площади распределения отрицательных напряжений;  $S_{\sigma_3}$  — площадь распределения положительных напряжений. Отрицательные напряжения в этом случае полагаются растягивающими, а положительные — сжимающими. В данном случае такое условие может быть записано с использованием площадей областей напряжений:

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

Исходя из этого, сущность рассматриваемого способа заключается в совместном применении способов неразрушающего определения остаточных напряжений в алюминиевых

плитах и известных теоретических положений [2] о виде эпюры их распределения в исследуемом образце. Реализация способа связана с выбором неразрушающего способа и настройкой используемой аппаратуры на исследуемый сплав.

После определения двух необходимых точек (А, В), необходимых для построения эпюры остаточных напряжений, распределенной по параболическому закону [2] (рис. 1), и при условии симметричного расположения этих точек, схематичное расположение распределений положительных и отрицательных напряжений с учетом дополнительных параметров можно привести эквивалентную замену на их площади.

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. 5.

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 А и В 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 [2]. 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. Основываясь на геометрических параметрах, характерных для эпюры распределения остаточных напряжений, принимается к использованию классическое уравнение параболы. Это позволяет при дальнейшем использовании подхода оценивать площади эпюр напряжений и их частей с помощью параболической зависимости и применять интегральные преобразования.

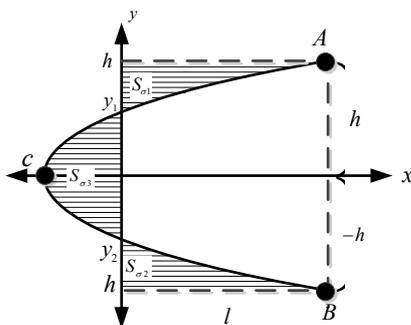


Рис. 5. Расчетная схема определения остаточных напряжений при помощи экспресс-метода

Уравнение параболы — наиболее простая расчетная схема для определения значений и зависимостей площадей растягивающих и сжимающих напряжений, симметричных оси абсцисс. Поэтому для последующих расчетов считаем закономерным и обоснованным решение о применении именно этого математического аппарата и связанных с ним теоретических выкладок при определении остаточных напряжений в алюминиевой плите.

Развитие предлагаемого подхода позволит получить по двум верхним точкам параболы остаточных напряжений их полную эпюру в близких к поверхности слоях. Находить эти точки можно при обследовании поверхности образца после снятия поверхностного слоя неразрушающими способами.

**III. Возможности способов определения остаточных напряжений.** Таким образом, совокупность существующих аналитических и экспериментальных способов определения остаточных напряжений позволяет определять общую схему их распределения в алюминиевой плите. Это достигается как при использовании одного из подходов, так и при их комплексном применении.

В этом плане более пригодными для определения остаточных напряжений являются теоретические подходы, так как подходы неразрушающего определения остаточных напряжений любого рода не всегда точно позволяют определить их распределение.

Хоть рентгеновские методы позволяют измерять деформацию кристаллической решетки, все же возникают сложности при разделении напряжений I и II рода. При этом именно напряжения I рода влияют на прочность и деформации деталей.

При определении методом сканирования знак и скорость изменения макронапряжений зависят от размеров зерна материала, при этом изготовить «идеальный» эталонный образец без остаточных напряжений I рода достаточно проблематично. Остаточные напряжения возникают еще при процессе прессования порошка, и в последующем, в процессе отжига, происходит частичная рекристаллизация с последующим дополнительным распределением остаточных напряжений. Поэтому невозможно оценить искажения от рентгеновского шума даже на эталонных образцах.

Также этими методами невозможно определить направление действия напряжения. При помощи рентгеновских методов можно только предположить направление усреднения найденных напряжений. Но возможность определения остаточных напряжений без разрушения детали является значительным преимуществом рентгеновского метода.

Использование способов и средств, основанных на применении скин-эффекта, имеет ряд недостатков, в том числе недостаточную глубину исследования.

Реализация механических методов предполагает разрушение образца, что не всегда приемлемо с точки зрения финансовой составляющей.

**Заключение.** Анализ совокупности методов определения остаточных напряжений в изделиях из алюминиевых сплавов показывает наличие широкого круга решенных проблем в данной области научных исследований как теоретического, так и экспериментального характера. Имеющиеся методы оценки наличия остаточных напряжений достаточно разнообразны и могут быть применены в различных ситуациях как отдельно, так и комплексно, для соотнесения полученных результатов. В том числе необходимо отметить подходы к формированию экспресс-методов определения общей картины напряжений при помощи имеющегося научно-исследовательского оборудования. В этой области одним из направлений развития является совместное использование данного способа, основанного на рентгеновском методе, и известных теоретических положений о виде симметричной эпюры напряжений.

*Литература*

1. Абрамов В.В. Остаточные напряжения и деформации в металлах. М.: Машиностроение, 1963. 355 с.
2. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Гос. науч.-техническое изд-во машиностроительной лит., 1963. 233 с.
3. Каргапольцев С.К. Остаточные деформации при фрезеровании маложестких деталей с подкреплением. Иркутск: Иркутский Дом печати, 1999. 136 с.
4. Вишняков Д.В., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. М.: Metallurgiya, 1989. 254 с.
5. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: справ. М.: Машиностроение, 1983. 248 с.
6. Промптов А.И. Формирование общих подходов к управлению качеством поверхности при механической обработке // Вестн. Иркутского гос. технического ун-та. 2005. № 2 (22). С. 98-101.
7. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. М.: Машиностроение, 1979. 360 с.
8. Кан С.Н., Сverdlov И.А. Расчет самолета на прочность. М.: Машиностроение, 1966. 520 с.
9. Тарасов Ю.Л., Лавров Б.А. Расчет на прочность элементов конструкции самолета. Самара: СГАУ, 2000. 112 с.
10. Одинок Ю.Г. Расчет самолета на прочность. М.: Машиностроение, 1973. 392 с.
11. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // Procedia CIRP. 2016. V. 45. P. 203-206.
12. Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения, деформации и трещины в отливках. М.: Машиностроение, 1981. 199 с.
13. Меркулова Г.А. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnykh splavov. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2008. 312 с.
14. 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.
15. Hill M.R. The Slitting Method // Practical Residual Stress Measurement Methods. Vancouver: University of British Columbia, 2013. P. 89-108.
16. Cheng W., Finnie I. Residual Stress Measurement and the Slitting Method. New York: Springer, 2007. 164 p.
17. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение, 2005. 226 с.
18. Дель Г.Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 247 с.
19. Zhongxu X., Changpeng C. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V // Materials & Design. 2020. V. 193. Art. 108846.
20. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. № 35. P. 572-588.
21. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier Science, 2001. Section 5a. P. 8152-8158.
22. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. № 1. P. 1-186.
23. Ботвенко С.И. Способ определения остаточных закалочных напряжений: пат. РФ № 494359 С1, МПК G01L1/00; заявл. 02.10.2012; опубл. 27.09.2013.
24. Хрянин В.Н., Безбородов И.А., Попов М.А., Пчельников А.В., Волобой Е.А. Способ определения остаточных напряжений в покрытиях: пат. РФ № 2757405, МПК G01N3/24; заявл. 12.03.2020; опубл. 10.15.2021.
25. Бякова А.В., Горбач В.Г., Власов А.А., Грушевский Я.Л. Способ определения остаточных напряжений: пат. РФ № 2032162 С1; заявл. 10.11.1991; опубл. 27.03.1995.
26. Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е., Курапова Н.А., Коноплев А.В., Каменев С.А. Способ определения остаточных напряжений в осесимметричных изделиях: пат. РФ № 2125252, МПК G01L1/00; заявл. 27.02.1997; опубл. 20.01.1999.
27. Сайт Иркутского национального исследовательского технического университета [Электронный ресурс]. URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/48185/> (дата обращения: 23.09.2023).
28. Иванов С.Ю., Васильков Д.В., Гутнер А.Б., Васильков С.Д., Бураков А.И. Устройство неразрушающего определения механических напряжений в поверхностном слое изделий из металлов и сплавов: пат. РФ № 64755, МПК G01B7/06; заявл. 06.09.2006; опубл. 20.06.2008.
29. Сайт Иркутского национального исследовательского технического университета [Электронный ресурс]. URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/46057/> (дата обращения: 23.09.2023).
30. Каргапольцев С.К., Гозбенко В.Е., Большаков Р.С. Метод оценки остаточных напряжений в заготовках из алюминиевых сплавов // Современные авиационные технологии. International Conference on Aviation Engineering: материалы XVI Междунар. науч.-практической конф. (3-7 июля 2023 г.). Иркутск: ИРНТУ, 2023. С. 86-91.

*References*

1. Abramov V.V. Residual stresses and deformations in. M.: Mashinostroenie, 1963. 355 p.
2. Birger I.A. Residual stresses. M.: Gos. nauch.-tekhnicheskoe izd-vo mashinostroitel'noy lit., 1963. 233 p.
3. Kargapol'tsev S.K. Residual deformations during milling of low-rigid parts with reinforcement. Irkutsk: Irkutskij Dom pechati, 1999. 136 p.
4. Vishnyakov D.V., Piskarev V.D. Management of residual stresses in metals and alloys. M.: Metallurgiya, 1989. 254 p.
5. Prigorovskij N.I. Methods and means for determining strain and stress fields: sprav. M.: Mashinostroenie, 1983. 248 p.
6. Promptov A.I. Formation of general approaches to surface quality management during machining // Vestnik of Irkutsk State Technical University. 005. № 2 (22). P. 98-101.
7. Belyanin P.N. Production of wide-body aircraft. M.: Mashinostroenie, 1979. 360 p.
8. Kan S.N., Sverdlov I.A. Aircraft strength calculation. M.: Mashinostroenie, 1966. 520 p.
9. Tarasov YU.L., Lavrov B.A. Strength calculation of aircraft structural elements. Samara: SGAU, 2000. 112 p.
10. Odinokov YU.G. Aircraft strength calculation. M.: Mashinostroenie, 1973. 392 p.
11. Rickert T. Residual Stress Measurement by ESPI Hole-Drilling // Procedia CIRP. 2016. V. 45. P. 203-206.
12. Konstantinov L.S., Truhov A.P. Stresses, deformations and cracks in castings. M.: Mashinostroenie, 1981. 199 p.
13. Merkulova G.A. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka cvetnykh splavov. Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2008. 312 p.
14. 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.
15. Hill M.R. The Slitting Method // Practical Residual Stress Measurement Methods. Vancouver: University of British Columbia, 2013. P. 89-108.
16. Cheng W., Finnie I. Residual Stress Measurement and the Slitting Method. New York: Springer, 2007. 164 p.

17. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Creep and relaxation of residual stresses in strengthened structures. M.: Mashinostroenie, 2005. 226 p.
18. Del' G.D. Determination of stresses in the plastic region by hardness distribution. M.: Mashinostroenie, 1971. 247 p.
19. Zhongxu X., Changpeng C. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V // Materials & Design. 2020. V. 193. Art. 108846.
20. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. № 35. P. 572-588.
21. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier Science, 2001. Section 5a. P 8152-8158.
22. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. № 1. P. 1-186.
23. Botvenko S.I. Method for determining residual quenching stresses: pat. RF № 494359 C1, MPK G01L1/00; zayavl. 02.10.2012; opubl. 27.09.2013.
24. Hryanin V.N., Bezborodov I.A., Popov M.A., Pchel'nikov A.V., Voloboj E.A. Method for determining residual stresses in coatings: pat. RF № 2757405, MPK G01N3/24; zayavl. 12.03.2020; opubl.10.15.2021.
25. Byakova A.V., Gorbach V.G., Vlasov A.A., Grushevskij YA.L. Method for determining residual stresses: pat. RF № 2032162 C1; zayavl. 10.11.1991; opubl. 27.03.1995.
26. Kolmogorov G.L., Mel'nikova T.E., Kurapova N.A., Konoplev A.V., Kamenev S.A. Method for determining residual stresses in axisymmetric products: pat RF № 2125252, MPK G01L1/00; zayavl. 27.02.1997; opubl. 20.01.1999.
27. Website of the Irkutsk National Research Technical University [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/48185/> (data obrashcheniya: 23.09.2023).
28. Ivanov S.YU., Vasil'kov D.V., Gutner A.B., Vasil'kov S.D., Burakov A.I. Device for non-destructive determination of mechanical stresses in the surface layer of products made of metals and alloys: pat. RF № 64755, MPK G01B7/06; zayavl. 06.09.2006; opubl. 20.06.2008.
29. Website of the Irkutsk National Research Technical University [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/46057/> (data obrashcheniya: 23.09.2023).
30. Kargapol'cev S.K., Gozbenko V.E., Bol'shakov R.S. Method for assessing residual stresses in workpieces made of aluminum alloys // Sovremennye aviacionnye tekhnologii. International Conference on Aviation Engineering: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (3-7 iyulya 2023 g.). Irkutsk: IRNITU, 2023. P. 86-91.

УДК 621.8, 621.2.082.18

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-32-37

## Математическое моделирование технологического процесса пропитки полиамидных деталей маслом

В.С. Бычковский

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

bikovskii\_vs@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

Статья поступила 23.08.2023, принята 23.10.2023

*Существуют различные технологические процессы, связанные с пропиткой полимерных и композиционных материалов для различных задач, одним из примеров таких технологий является повышение эксплуатационных характеристик полиамидных деталей путем их пропитки моторными маслами. Данные технологии имеют существенный недостаток, а именно в определении момента достижения наполненного состояния или же конкретно для повышения износостойкости полиамидной детали из ПАБ по технологии пропитки моторным маслом, определения момента достижения пропитки масляного наполнителя на заданную глубину. В связи с этим возникает необходимость в определении скорости движения математической модели пропитки полиамидных деталей маслом. Для достижения данной цели проанализирован сам физический процесс влагопоглощения полимеров для обоснования возможности пропитки их маслом. Рассмотрена математическая модель капиллярной пропитки по закону фильтрации пористой среды, описываемой системой уравнений неразрывности и закона Дарси. Анализ данной математической модели позволил выявить линейный закон изменения разности давления, исходя из этого, была выдвинута гипотеза с последующим ее доказательством, благодаря проведенным численным расчетам и проведенным экспериментам для случая пропитки полиамидного образца размерами 4x50x50 мм моторным маслом М-8В по выявлению линейного закона изменения температуры. Данная гипотеза заключается в замене линейного закона изменения разности давления в системе уравнений на закономерность линейного изменения температуры с учетом поправочного коэффициента. Итогом данной работы стала сформулированная собственная математическая модель пропитки полиамидных материалов моторным маслом с целью определения скорости для обеспечения проникновения масляного наполнителя на заданную глубину. Основным преимуществом математической модели является ее решение благодаря наиболее доступной методике определения разности температуры полиамидного образца при пропитке снизу-вверх.*

**Ключевые слова:** математическая модель; технологический процесс; закон Дарси; программный комплекс; маслonaполнение полиамида; полиамид-6.