

ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС В АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.77.04:669:631.3

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>



Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники

Н.К. Толочко¹, П.В. Авраменко^{2✉}, В.Б. Кравцов³, П.В. Голиницкий⁴

^{1, 2, 3} Белорусский государственный аграрный технический университет; г. Минск, Беларусь

⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

¹ n.tolochko1951@mail.ru

² minsk888@mail.ru[✉]; <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>

³ kravcovslava@tut.by

⁴ gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

Аннотация. Усталостное разрушение – наиболее часто встречающийся вид отказов деталей сельскохозяйственной техники. При создании деталей сельскохозяйственной техники некоторые ученые предлагают использовать металлические многослойные структуры. С целью обоснования использования металлических многослойных структур, а также определения возможных путей повышения их усталостной прочности провели аналитический обзор научной литературы по вопросам усталостного разрушения многослойных металлических структур. Рассмотрели особенности реализации аддитивной технологии листового ламинирования на примере изготовления деталей сельскохозяйственной техники. Определили характер влияния толщины, количества и свойств слоев и межслойных границ на усталостную прочность металлических образцов с многослойной структурой, получаемых с помощью традиционных технологий сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой, и деталей с подобной многослойной структурой, получаемых с использованием аддитивной технологии листового ламинирования. Рассмотрели пример усталостного разрушения детали с механическим и клеевым соединением слоев. На основе результатов проведенного анализа предложили технические подходы к аддитивному изготовлению металлических деталей с многослойной структурой, обеспечивающие повышение их усталостной прочности. Дали рекомендации по выбору исходных металлических листов для вырезки листовых выкроек, по установлению толщины и общего количества выкроек, по формированию отверстий в выкройках, служащих для их соединения механическим крепежом, а также для уменьшения массы в рамках топологической оптимизации. Задачей дальнейших исследований прочностных свойств металлических многослойных структур является экспериментальное определение характера зависимости усталостного разрушения детали от количества составляющих ее слоев.

Ключевые слова: металлические многослойные структуры; количество слоев; толщина слоев; усталостная прочность; усталостное разрушение; усталостная трещина; аддитивная технология листового ламинирования

Для цитирования: Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Голиницкий П.В. Теоретическое обоснование использования металлических многослойных структур при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 64-73. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>

ORIGINAL ARTICLE

Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery

N.K. Tolochko¹, P.V. Auramenka^{2✉}, V.B. Kravtsov³, P.V. Golinitzkiy⁴

^{1,2,3} Belarusian State Agrarian Technical University; Minsk, Belarus

⁴ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

¹ n.tolochko1951@mail.ru

² minsk888@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>

³ kravcovslava@tut.by

⁴ gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>

Abstract. Fatigue failure is the most common type of failure of agricultural machinery parts. When designing parts of agricultural machinery, some scientists suggest using metal multilayer structures. In order to justify the use of metal multilayer structures, as well as to determine the possible ways to increase their fatigue strength, the authors conducted an analytical review of scientific literature on fatigue failure of metal multilayer structures. They considered some specific features of the implementation of the additive technology of sheet lamination using the case of manufacturing agricultural machinery parts. As a result, they have determined the influence of thickness, number and properties of layers and interlayer boundaries on the fatigue strength of metal samples with a multilayer structure, obtained using the conventional technologies by explosion welding or hot packet rolling, and parts with similar multilayer structure, obtained using the additive sheet lamination technology. The authors considered an example of fatigue failure of a part with mechanical and adhesive bonding of layers. Based on the analysis results, they proposed technical approaches to the additive manufacturing of metal parts with a multilayer structure, providing an increase in their fatigue resistance. They have offered recommendations on the selection of initial metal sheets for cutting out sheet patterns, on determining thickness and total number of the patterns, on making holes in the patterns serving to connect them with mechanical fasteners, as well as to reduce weight to ensure topological optimization. The task of further research of strength properties of metal multilayer structures is the experimental determination of the relationship type between the fatigue failure of a part and the number of its composition layers.

Keywords: metal multilayer structures; number of layers; layer thickness; fatigue strength; fatigue failure; fatigue crack; additive sheet lamination technology

For citation: Tolochko N.K., Auramenka P.V., Kravtsov V.B., Golinitzkiy P.V. Theoretical grounds for the use of metal multilayer structures in the manufacturing and repair of agricultural machinery. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):64-73 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-64-73>

Введение

Надежность и качество сельскохозяйственной техники складываются из множества составляющих [1]. В процессе эксплуатации чаще всего наблюдаются постепенные отказы, которые теоретически и практически можно спрогнозировать. Особенно важна проектная оценка надежности, в том числе путем изменения параметров прочности, износостойкости, точности и др. [2]. Усталостное разрушение является одним из наиболее часто встречающихся видов отказов деталей сельскохозяйственной техники. Оно имеет место при воздействии на детали циклически изменяющихся во времени нагрузок, приводящих к зарождению усталостных трещин и их дальнейшего развития вплоть до окончательного разрушения деталей.

Для повышения усталостной прочности деталей применяются различные технические подходы

к совершенствованию их конструкции. Поскольку большинство деталей сельскохозяйственной техники являются металлическими, то один из таких подходов, применяемых при их изготовлении, связан с целенаправленным созданием металлических многослойных структур.

В последние годы выполнен ряд экспериментальных исследований усталостной прочности металлических образцов с многослойной (слоистой) структурой (Т-М-структурой), создаваемой по традиционным технологиям путем соединения листов металлов между собой сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой [3-8]. Т-М-структуры обычно состоят из чередующихся слоев двух разнородных металлов (чаще всего сталей разных марок), то есть представляют собой слоистые композиты, но иногда они содержат слои одинакового состава. Металлические образцы с Т-М-структурой (Т-М-образцы)

обладают более высокой усталостной прочностью по сравнению с соответствующими металлическими образцами с обычной монолитной структурой и служат в качестве заготовок, из которых, используя различные способы металлообработки, изготавливают металлические детали.

При изготовлении деталей сельскохозяйственной техники все большее распространение находят различные виды аддитивных технологий, позволяющие создавать детали из металлов¹. Среди них особое место занимает аддитивная технология листового ламинирования (Sheet Lamination, SL), согласно которой детали получают путем пакетирования специально подготовленных контурных выкроек из листовых металлов и их соединения между собой различными способами (в основном с помощью механического крепежа и клея) [9]. Получаемые с помощью SL-технологии металлические детали имеют многослойную (слоистую) структуру (SL-M-структуру), подобную металлическим Т-М-образцам. Следует ожидать, что получаемые таким образом металлические детали (SL-M-детали) так же, как и экспериментальные металлические Т-М-образцы, обладают повышенной усталостной прочностью. Поэтому в практическом отношении важно рассмотреть в сравнении факторы, обусловленные конструктивными особенностями металлических Т-М-образцов и металлических SL-M-деталей и влияющие на усталостную прочность тех и других, чтобы определить возможные пути повышения усталостной прочности SL-M-деталей с учетом технологических особенностей их аддитивного изготовления.

Цель исследований: провести сравнительный анализ влияющих на усталостную прочность факторов, обусловленных конструктивными особенностями металлических Т-М-образцов и SL-M-деталей, с целью возможного применения аддитивной технологии листового ламинирования при изготовлении деталей несущих систем и рабочих органов сельскохозяйственной техники, в том числе для снижения их металлоемкости.

Материалы и методы

На основе аналитического обзора научно-информационных источников (научных статей, материалов научных конференций, диссертаций), посвященных вопросам усталостной прочности экспериментальных металлических образцов с многослойной структурой, получаемых соединением листов металлов сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой,

установили факторы, обусловленные конструктивными особенностями и оказывающие влияние на усталостную прочность экспериментальных образцов, и определили характер этого влияния. Рассмотрели влияние толщины, количества и свойств слоев и межслойных границ на усталостную прочность многослойных образцов и деталей, обладающих, подобно образцам, многослойной структурой, получаемой при изготовлении деталей с использованием аддитивной технологии листового ламинирования. При проведении обзорно-аналитических исследований использовали методы обобщения и систематизации научных данных. С учетом результатов проведенного анализа определили и обосновали технические подходы к аддитивному изготовлению металлических деталей с многослойной структурой, обеспечивающие повышение их усталостной прочности.

Результаты и их обсуждение

Для прямого создания деталей из металла разработан ряд аддитивных технологий, основанных на селективной термообработке металлического порошка или проволоки, осуществляемой лазерным (Selective Laser Melting, Laser Metal Deposition) или электронным лучом (Electron Beam Melting, Electron Beam Freeform Fabrication), а также плазмой (Ion Fusion Formation) или электродуговым разрядом (Gas metal arc welding). В связи с высокой стоимостью технологического оборудования (3D-принтеров), малыми размерами рабочей зоны построения, низкой производительностью, обусловленной присущим им последовательно-фрагментарным характером формирования наращиваемых слоев строительного материала, эти технологии не получили широкого распространения.

Принципиально отличается от них SL-технология, позволяющая создавать детали из металлических листов. В практическом отношении наиболее интересен один из вариантов этой технологии – CSB-SL-технология, которая реализуется по схеме «cut-stack-bond» (CSB) с такой последовательностью операций: контурный раскрой листового металла (лазером или фрезой), пакетирование листовых выкроек и их соединение между собой. Эта технология характеризуется: сравнительно малой стоимостью технологического оборудования – раскройных станков; большими размерами рабочей зоны построения, которые определяются размерами раскройного стола и достигают 1-2 м и более; высокой производительностью, поскольку создаваемая деталь наращивается сразу же готовыми слоями – листовыми выкройками [9].

¹ Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

В последние несколько лет в БГАТУ разрабатывается SL-технология и изготавливаются металлические SL-M-детали машин. Примером реализации SL-технологии является грядиль оборотного плуга с многослойной структурой, состоящий из листовых выкроек, вырезанных лазером из стальных листов и стянутых болтами в пакет [10].

Уменьшение массы сельхозтехники позволяет снизить расход топлива и повысить энергоэффективность эксплуатации. Для уменьшения массы грядиля проводили топологическую оптимизацию конструкции листовых выкроек, которая сводилась к созданию в них, наряду с отверстиями, служащими для установки болтов, дополнительных, более крупных сквозных отверстий. На рисунке 1 показаны внешний вид листовых выкроек с оптимизированной топологией и собранный из них SL-M-грядиль. Благодаря топологической оптимизации масса грядиля уменьшилась почти на 20% по сравнению с исходной. При изготовлении грядиля в заводских условиях с использованием SL-технологии производительность изготовления увеличилась в ~1,5 раза, а себестоимость изготовления уменьшилась в ~1,5 раза по сравнению с традиционным изготовлением. Полевые испытания показали работоспособность SL-M-грядиля.

С помощью SL-технологии можно изготавливать и другие металлические детали машин – например, детали несущих систем (рамы, кузова, подвески), рабочих органов (для почвообрабатывающих, землеройных, измельчающих машин), крыльчаток (пропеллеров) и т.д. Многие детали такого рода, включая грядиль, при эксплуатации подвергаются циклическим нагрузкам, поэтому при их изготовлении следует принимать меры по обеспечению повышенной усталостной прочности.

Факторы усталостной прочности Т-М-образцов. Усталостная прочность металлических экспериментальных Т-М-образцов зависит от ряда факторов, обусловленных конструктивными особенностями образцов, которые в свою очередь связаны с особенностями их изготовления.

Для экспериментального исследования усталостной прочности Т-М-образцы подвергают усталостным (циклическим) испытаниям, осуществляемым по схеме растяжения [3, 4, 6] или по схеме изгиба [5, 7]. В первом случае повторяющаяся знакопеременная нагрузка действует вдоль, а во втором – перпендикулярно плоскости слоев испытуемых Т-М-образцов. Для проведения усталостных испытаний используют разные виды испытательных машин: Instron8801, УРМ-2000, Mikrotron, Schenk-Erlinger. Обычно Т-М-образцы содержат до 20 слоев с толщиной каждого слоя не более 1 мм,

но иногда они состоят из сотен слоев толщиной в десятки микрон [7]. В большинстве Т-М-образцов все слои приблизительно одинаковы по толщине, за исключением отдельных случаев, когда сравнительно толстые слои (из стали) разделены тонкими прослойками (из меди или алюминия). При проведении ряда испытаний как на растяжение, так и на изгиб, в Т-М-образцах делают надрезы (концентраторы напряжений), инициирующие образование трещин.

В ходе испытаний определяют количество циклов нагружения до зарождения усталостной трещины и до усталостного разрушения испытуемого образца, строят диаграммы усталостного разрушения (зависимости длины усталостной трещины от количества циклов нагружения/зависимости скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений), а также проводят фрактурграфические исследования поверхности усталостных изломов, выполняют фото/видео съемку усталостных трещин на разных стадиях развития.

Анализ результатов усталостных испытаний показывает, что Т-М-образцы, характеризующиеся наличием специально сформированной многослойной структуры, обладают более высокой усталостной прочностью, чем аналогичные образцы с обычной монолитной структурой. Это связано с тем, что в слоистых образцах границы раздела слоев являются эффективными барьерами на пути распространения усталостных трещин. Как следствие, для полного разрушения слоистого образца, то есть для прохождения трещины сквозь все его слои, требуются дополнительные затраты и энергии, и времени. Это обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, трещина, пройдя сквозь очередной слой и оказавшись

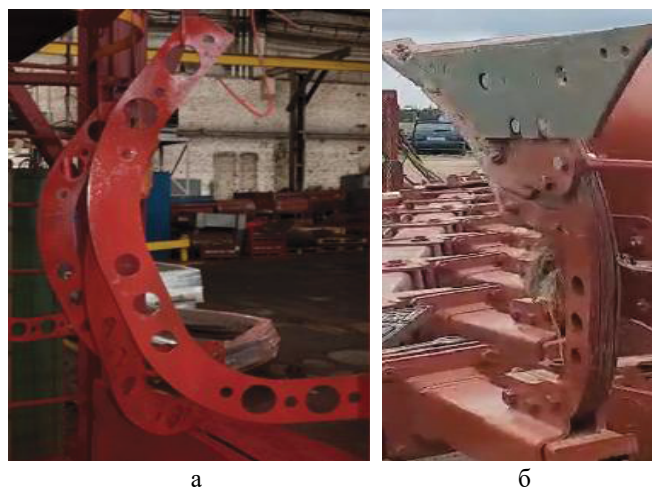


Рис. 1. Листовые выкройки SL-M-грядиля (а) и SL-M-грядиль в составе плуга (б)

Fig. 1. Sheet patterns of SL-M-plowbar (a) and SL-M-plowbar as part of a plough (b)

на межслойной границе, изменяет траекторию своего движения: она отклоняется от магистрального развития в направлении, перпендикулярном слоям, и кратковременно продвигается вдоль межслойной границы (при этом она также может разветвляться). Во-вторых, чтобы трещина могла продолжить магистральное развитие в новом слое (не содержащем надрезов или иных значительных концентраторов напряжений), необходим, соответственно, новый инкубационный период для ее зарождения в этом слое.

Таким образом, если в монолитном образце усталостная трещина распространяется практически прямолинейно и равномерно, то в слоистом образце она движется зигзагообразно, изменяя направление движения на межслойных границах, и с остановками, связанными с ее перезарождением в каждом новом слое.

Усталостная прочность Т-М-образцов, а также характер их усталостного разрушения зависят от количества, толщины, свойств слоев и межслойных границ.

Свойства слоев. Т-М-образцы могут различаться составом образующих их слоев. Так, в работе [5] исследовалась усталостная прочность нескольких типов слоистых композитов. Одни из них состояли из одинаковых по составу слоев («сталь 20 – сталь 20», «ВТ1-0 – ВТ1-0»), другие – из разных («сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т», «сталь 12Х18Н10Т – сталь 5ХВ2С», «сталь 20 – сталь Н18К9М5Т», «титановый сплав ВТ23 – титановый сплав ВТ14», «Ti – Al», «Ni – Al»). Соответственно разные по составу Т-М-образцы могут обладать различной усталостной прочностью. Например, слоистые композиты типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 12Х18Н10Т» имеют более высокую циклическую трещиностойкость, чем композиты типа «сталь Н18К9М5Т – сталь 20»: скорость распространения усталостной трещины в первом случае в 2 раза меньше, чем во втором [3].

Кроме того, Т-М-образцы могут различаться структурой образующих их слоев, что также может отражаться на их усталостной прочности. Например, в слоистых композитах типа «сталь 09Г2С – сталь ЭП678» циклическая трещиностойкость повышается, если стальные слои имеют не мелкозернистую, а ультрамелкозернистую структуру (в определенной области значений коэффициента интенсивности напряжений) [6].

Свойства межслойных границ. Границы раздела слоев в Т-М-образцах могут иметь разные структурно-механические свойства в зависимости от способов формирования. Как следствие, они могут по-разному влиять на характер усталостного разрушения Т-М-образцов. Так, в слоистых композитах,

полученных сваркой взрывом стальных слоев, границы раздела слоев характеризуются более высокой склонностью к разрушению, чем сами слои, поэтому магистральная усталостная трещина, пересекая эти границы, отклоняется от прежней прямолинейной траектории или разветвляется [3, 5]. Таким образом, межслойные границы, выполняя роль эффективных барьеров на пути распространяющихся трещин, способствуют повышению усталостной трещиностойкости Т-М-образцов.

При сравнении результатов усталостных испытаний Т-М-образцов типа «сталь 09Г2С – сталь ЭП678», полученных сваркой взрывом и горячей пакетной прокаткой, установлено, что снижение скорости роста усталостной трещины при переходе межслойной границы проявляется в большей степени в горячекатаных слоистых композитах, поскольку горячая прокатка обеспечивает меньшую прочность соединения слоев, чем сварка взрывом [6].

Особым видом межслойных границ в Т-М-образцах являются тонкие прослойки на основе меди или алюминия, обладающие сравнительно малой прочностью, выполненные между гораздо более прочными стальными слоями [4, 6]. Скорость усталостной трещины при переходе из стального слоя в алюминиевую или медную прослойку сразу же падает, трещина начинает двигаться вдоль прослойки. Дальнейшее распространение трещины в новом стальном слое становится возможным спустя некоторое время, то есть после определенного количества циклов нагружения, необходимых для зарождения трещины в этом слое.

Количество и толщина слоев. Поскольку в Т-М-образцах межслойные границы играют роль барьеров на пути распространяющихся трещин, то увеличение количества слоев n и соответствующее уменьшение их толщины h (для образцов с фиксированными размерами) приводят к повышению усталостной прочности [3, 6, 8]. Например, результаты усталостных испытаний Т-М-образцов типа «сталь 08Х18 – сталь 08Х18Н10», полученных горячей прокаткой, показывают, что при увеличении количества слоев со 100 до 1400 (при соответствующем уменьшении толщины отдельных слоев с 20 мкм до 3 мкм) циклическая долговечность увеличивается в 3,5 раза [8].

Отметим, что увеличение количества слоев n и, как следствие, уменьшение толщины h имеют определенные пределы. Так, на примере усталостных испытаний Т-М-образцов типа «металл – интерметаллид» с чередующимися слоями Ti-Al3Ti-Al-Al3Ti установлено, что при некоторой крайне малой толщине слоев (~10 мкм) могут изменяться условия развития усталостной трещины, вследствие чего эффект

расслоения не проявляется, а разрушение происходит так же, как и в монолитных образцах [6].

Факторы усталостной прочности SL-M-деталей.

Усталостная прочность металлических SL-M-деталей также зависит от факторов, обусловленных конструктивными особенностями деталей.

SL-M-детали чаще всего изготавливают путем соединения между собой листовых выкроек из сталей, обладающих высокими прочностными свойствами и широко применяемыми в традиционном производстве деталей машин с монолитной структурой. Для соединения выкроек применяют механический крепеж или клей. При использовании механического крепежа между слоями остаются зазоры, ширина которых определяется шероховатостью поверхностей слоев. В такой SL-M-детали усталостная трещина после прохождения сквозь очередной слой не изменяет направление траектории и не двигается вдоль межслойной границы, вызывая расслоение, как это происходит при усталостном разрушении Т-М-образцов со сварным или горячекатаным соединением слоев. Выйдя на границу раздела слоев, трещина прекращает свое дальнейшее развитие, а в новом слое спустя некоторое время зарождается новая трещина. Таким образом, магистральная усталостная трещина, последовательно проходящая через все слои, фактически представляет собой набор отдельных трещин, каждая из которых зарождается и распространяется в пределах очередного нового слоя. При этом место зарождения трещины в новом слое определяется местоположением на его поверхности концентраторов напряжения, способных инициировать это зарождение. Поскольку концентраторы напряжения могут распределяться на поверхности слоя случайным образом, то место зарождения трещины в новом слое

может как совпадать, так и не совпадать с местом выхода трещины из предыдущего слоя. Соответственно траектория магистральной усталостной трещины, проходящей последовательно сквозь все слои, имеет вид прерывистой линии, отдельные отрезки которой смещены относительно друг друга.

Диаграмма усталостного разрушения (зависимости длины усталостной трещины L от количества циклов нагружения N) SL-M-детали с механическим соединением слоев и соответствующая ей траектория магистральной усталостной трещины схематично показаны на рисунке 2.

Для упрощения построений предполагалось, что все слои выполнены без надразов и имеют одинаковую толщину h , а межслойные зазоры – одинаковую ширину b . Также предполагалось, что в каждом i -м слое трещина развивается в два этапа: на первом отмечается инкубационный период N_{zi} , необходимый для зарождения трещины в i -м слое, на втором – период роста трещины N_{pi} , в течение которого трещина полностью проходит сквозь i -й слой. Длительность каждого этапа для всех слоев одинакова, то есть $N_{zi} = \text{const}$ и $N_{pi} = \text{const}$ (в действительности же, в силу неоднородности структуры слоев, случайного характера распределения в них структурных дефектов для каждого слоя значения N_{zi} и N_{pi} могут существенно различаться). Кроме того, предполагалось, что трещина распространяется во всех слоях по прямой линии, перпендикулярной слоям.

Долговечность детали с монолитной структурой, полученной по традиционным технологиям и работающей в условиях циклического нагружения, включает в себя инкубационный период N_z и период роста трещины N_p [11]:

$$N = N_z + N_p. \quad (1)$$

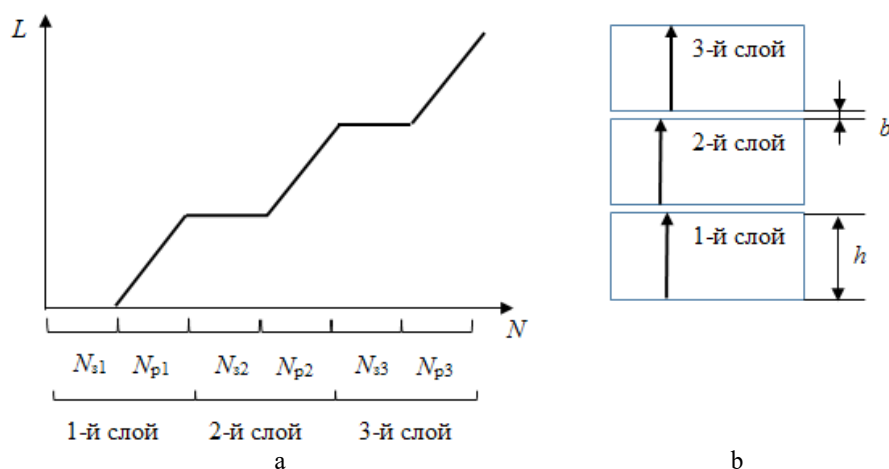


Рис. 2. Диаграмма усталостного разрушения SL-M-детали с механическим соединением слоев (a) и траектория магистральной усталостной трещины (b)

Fig. 2. Fatigue failure diagram (a) and trajectory of the main fatigue crack (b) (SL-M part with mechanical connection of layers)

Аналогично определяется долговечность единичного i -го слоя SL-M-детали, работающей в условиях циклического нагружения, с учетом различных значений N_{zi} и N_{pi} :

$$N_i = N_{zi} + N_{pi}. \quad (2)$$

Соответственно долговечность SL-M-детали, состоящей из n механически соединенных слоев и работающей в условиях циклического нагружения, –

$$N_n = k \sum_{i=1}^n (N_{zi} + N_{pi}), \quad (3)$$

где k – коэффициент, учитывающий снижение долговечности, вызванное наличием в слоях отверстий, служащих для установки элементов механического крепежа (болтов, штифтов, заклепок), обеспечивающих соединение слоев между собой ($k < 1$).

Известно, что такие отверстия в слоях являются концентраторами напряжений, способными инициировать образование множественных усталостных трещин [12].

Длина усталостной трещины в каждом слое L_i является неодинаковой (даже если слои имеют одинаковую толщину, то в силу неоднородности их структуры трещина может проходить по произвольным ломаным линиям, имеющим разный наклон к слоям). Общая длина магистральной усталостной трещины, прошедшей через n слоев, –

$$L_n = \sum_{i=1}^n L_i. \quad (4)$$

Иной характер имеет усталостное разрушение SL-M-детали с клеевым соединением металлических слоев. Здесь важно учитывать соотношение прочности материала клеевых прослоек $\sigma_{\text{п}}$ и прочности сцепления металлических слоев с клеевыми

прослойками $\sigma_{\text{сп}}$. Если $\sigma_{\text{п}} > \sigma_{\text{сп}}$, то наиболее вероятно когезионное разрушение, проявляющееся в разрыве материала клеевой прослойки, если $\sigma_{\text{п}} < \sigma_{\text{сп}}$, то адгезионное разрушение, проявляющееся в отрыве клеевой прослойки от металлического слоя. Поскольку в SL-M-детали с клеевым соединением металлических слоев значения $\sigma_{\text{п}}$ и $\sigma_{\text{сп}}$ могут быть неодинаковыми в разных местах прослойки, то на практике возможно проявление одновременно когезионного и адгезионного вариантов разрушения. Например, указанные варианты разрушения наблюдались при испытаниях на прочность многослойных изделий, изготовленных из алюминиевых пластин, соединенных эпоксидным клеем [13].

Усталостное разрушение SL-M-деталей с клеевым соединением металлических слоев по своему характеру подобно рассмотренному выше усталостному разрушению Т-М-образцов, полученных путем соединения металлических слоев между собой сваркой взрывом или горячей пакетной прокаткой. В том и другом случаях усталостная трещина движется зигзагообразно, изменяя направление движения на межслойных границах, и с остановками, связанными с ее перезарождением в каждом новом металлическом слое. При этом в случае SL-M-деталей с клеевым соединением металлических слоев в качестве межслойных границ выступают тонкие клеевые прослойки.

Диаграмма усталостного разрушения SL-M-детали с клеевым соединением слоев и соответствующая ей траектория магистральной усталостной трещины показаны на рисунке 3. Здесь также предполагались одинаковая толщина всех слоев h и ширина прослоек b , кроме того, все слои выполнены без надрезов. Вместе с тем предполагалось, что в каждом слое трещина развивается в три этапа

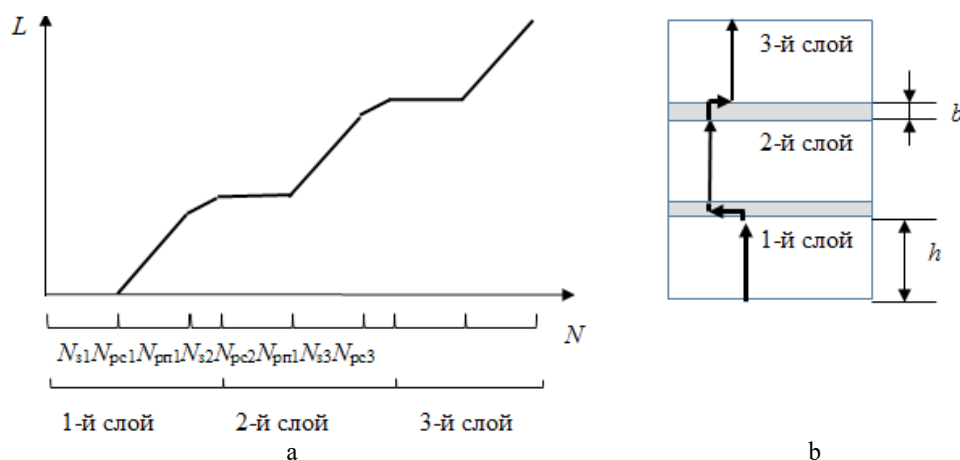


Рис. 3. Диаграмма усталостного разрушения SL-M-детали с клеевым соединением слоев (а) и траектория магистральной усталостной трещины (б)

Fig. 3. Fatigue failure diagram and main fatigue crack trajectory (SL-M part with adhesive bonding of layers)

включая инкубационный период N_{zi} , необходимый для зарождения трещины в i -м слое; период движения трещины сквозь i -й слой N_{pci} ; период движения трещины вдоль i -й прослойки N_{pii} (внутри самой прослойки или по границе прослойки и слоя).

Долговечность SL-M-детали, состоящей из n склеенных слоев и работающей в условиях циклического нагружения, –

$$N_n = k \left[\sum_{i=1}^n (N_{zi} + N_{pci}) + \sum_{i=1}^{n-1} N_{pii} \right]. \quad (5)$$

Общая длина магистральной усталостной трещины для SL-M-детали с клеевым соединением n слоев, в отличие от SL-M-детали с механическим соединением слоев, включает в себя не только длину трещин L_{ci} , прошедших через n слоев, как показано в формуле (4), но также длину трещин L_{pi} , прошедших через $(n-1)$ прослоек:

$$L_n = \sum_{i=1}^n L_{ci} + \sum_{i=1}^{n-1} L_{pi}. \quad (6)$$

С помощью уравнений (3), (5) можно лишь приближенно описать кинетические закономерности процессов усталостного разрушения и, соответственно, дать оценку усталостной прочности SL-M-деталей, исходя из предположения того, что зависимость $N_n(n)$ является линейной. В действительности же, как показал анализ результатов исследований усталостной прочности металлических Т-М-образцов, характер этой зависимости до сих пор не установлен. В разных случаях она может иметь разный вид, в том числе нелинейный. Поэтому экспериментальное определение характера этой

зависимости, то есть вида функции $N_n = f(n)$, является одной из первостепенных задач дальнейших исследований прочностных свойств металлических многослойных структур, в том числе SL-M-деталей, работающих в условиях циклического нагружения.

Пути повышения усталостной прочности SL-M-деталей. Особенности изготовления и связанные с ними особенности конструкции металлических Т-М-образцов и SL-M-деталей, влияющие на их усталостную прочность, представлены в таблице.

Как следует из таблицы, при изготовлении SL-M-деталей практически нельзя обеспечить повышение усталостной прочности непосредственно на стадии формирования многослойной структуры, как это делается при изготовлении Т-М-образцов за счет высокоэнергетической термомеханической обработки. Но этого можно достигнуть на стадии создания листовых выкроек для SL-M-деталей путем управления факторами усталостной прочности, обусловленными конструкцией деталей, для чего нужно руководствоваться представленными ниже положениями.

1. Выкройки следует вырезать из листовых сталей (или других металлов), обладающих в состоянии поставки достаточно высокой усталостной прочностью с учетом характера циклических нагрузок, которым подвергаются изготавливаемые SL-M-детали во время эксплуатации.

2. SL-M-детали следует собирать из листовых выкроек, имеющих как можно меньшую толщину, поскольку при заданной высоте детали H с уменьшением толщины выкроек h обратно пропорционально увеличивается общее количество выкроек n ,

Таблица

Особенности изготовления и конструкции Т-М-образцов и SL-M-деталей, влияющие на их усталостную прочность

Table

Features of manufacturing and design of T-M-samples and SL-M-parts, affecting their fatigue strength

Т-М-образцы	SL-M-детали
При изготовлении Т-М-образцов исходные листы металла соединяют горячей прокаткой и сваркой взрывом или давлением, так что они сливаются воедино, образуя сплошную квазимонолитную металлическую структуру.	При изготовлении SL-M-деталей листовые выкройки металла соединяют механическим крепежом или клеем, так что они оказываются разделенными зазорами или клеевыми прослойками.
При изготовлении Т-М-образцов происходит измельчение зеренной структуры образующих их слоев металла за счет термомеханической обработки исходных листов металла.	При изготовлении SL-M-деталей в образующих их листовых выкройках металла сохраняется зеренная структура, присущая исходным коммерчески доступным листам металла.
Т-М-образцы имеют сравнительно малую толщину образующих их слоев, которая достигается в процессе изготовления за счет термомеханической обработки, и, соответственно, сравнительно большое количество слоев.	SL-M-детали имеют сравнительно большую толщину образующих их слоев, которая определяется толщиной исходных коммерчески доступных листов металла, и, соответственно, сравнительно малое количество слоев.
При изготовлении Т-М-образцов не предполагается создание отверстий в соединяемых слоях, которые могли бы играть роль концентраторов напряжений, способствующих усталостному разрушению.	При изготовлении SL-M-деталей в листовых выкройках создают отверстия для установки элементов механического крепежа либо для уменьшения массы в рамках топологической оптимизации, которые являются концентраторами напряжений, способствующими усталостному разрушению.

что, как показано выше, ведет к повышению усталостной прочности: $n = H/h$ [14]. Но вместе с тем следует учитывать, что с увеличением количества выкоек растет продолжительность и повышается себестоимость изготовления деталей. Кроме того, следует учитывать зависимость долговечности деталей, работающих в условиях циклического нагружения, от количества выкоек.

3. Отверстия в листовых выкройках SL-M-деталей, служащие для установки элементов механического крепежа, а также дополнительные отверстия, создаваемые в рамках топологической оптимизации и служащие для уменьшения массы, не следует располагать в области значительных циклических деформаций деталей при эксплуатации, чтобы не провоцировать зарождения усталостных трещин. Также по этой же причине дополнительные отверстия, в отличие от сквозных отверстий под крепеж, предпочтительно создавать так, чтобы они, будучи

расположенными в разных выкройках, не совпадали друг с другом по местоположению при пакетировании выкоек.

Выводы

Металлические многослойные структуры обладают повышенной усталостной прочностью, поэтому на их основе является перспективным создавать детали машин, работающие в условиях значительных циклических воздействий. Для изготовления металлических деталей с многослойной структурой, характеризующихся сложной формой, прежде всего, в условиях единичного и мелкосерийного производства, особенно эффективное применение может найти аддитивная технология листового ламинирования. Данную технологию, дополненную применением топологической оптимизации, можно использовать при изготовлении деталей несущих систем и рабочих органов сельскохозяйственной техники с целью снижения их металлоемкости.

Список источников

1. Ерохин М.Н., Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Вергазова Ю.Г., Скороходов Д.М. Производство и ремонт отечественных машин для агропромышленного комплекса с позиции принципа 5М // Вестник машиностроения. 2023. № 8. С. 701-704. EDN: BUMPSG
2. Леонов О.А., Шкаруба Н.Ж., Темасова Г.Н., Вергазова Ю.Г., Голиницкий П.В. Расчет допуска посадки с зазором для повышения относительной износостойкости соединений // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 3. С. 261-269. EDN: TFDITN
3. Приходько Е.А., Никулина А.А., Батаев И.А., Попелюх А.И., Батаев А.А., Ложкин В.С. Структура и усталостная трещиностойкость многослойного композита «сталь 20 – сталь 12Х18Н10Т», полученного сваркой взрывом // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 3. С. 28-34. EDN: PZERHN
4. Дидык Р.П., Козечко В.А. Многослойные конструкции повышенной трещиностойкости, сформированные сваркой взрывом // Автоматическая сварка. 2015. № 2. С. 54-57. EDN: THTTJL
5. Батаев И.А. Формирование структуры сваренных взрывом материалов: экспериментальные исследования и численное моделирование // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. Т. 77, № 4. С. 55-67. <http://dx.doi.org/10.17212/1994-6309-2017-4-55-67>
6. Пацелов А.М., Гладковский С.В., Лавриков Р.Д., Каманцев И.С. Трещиностойкость слоистых композитов с чередованием слоев Ti-Al3Ti-Al-Al3Ti в условиях статического и циклического нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2014. № 12. С. 7-11. EDN: TBRGLF
7. Минаков А.А., Плохих А.И. О влиянии деформационных механизмов на увеличение циклической долговечности в многослойных стальных материалах // Проблемы механики современных машин: Материалы VII Международной научной конференции. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2018. Т. 1. С. 259-262. EDN: YQSEXZ
8. Минаков А.А., Титова А.С., Букеткин Б.В. Исследование поведения многослойных стальных материалов в условиях малоциклового усталости при знакопеременном изгибе с сильным нагружением // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. № 29. С. 51-57. EDN: AIWWCZ

References

1. Erokhin M.N., Leonov O.A., Shkaruba N.J., Vergazova Y.G., Skorokhodov D.M. Production and repair of domestic machines for agroindustrial complexes from the position of the 5M principle. *Vestnik Mashinostroeniya*. 2023;8:701-704. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2023-102-8-701-704>
2. Leonov O.A., Shkaruba N.J., Temasova G.N., Vergazova Yu.G., Golinitzky P.V. Calculation of the tolerance of the fit with a gap to increase the relative wear resistance of joints. *Friction and Wear*. 2023;44(3):261-269. (In Russ.) <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2023-44-3-261-269>
3. Prikhodko E.A., Nikulina A.A., Bataev I.A., Popelyukh A.I., Bataev A.A., Lozhkin V.S. Structure and fatigue crack resistance of multilayer composite “Steel 20 – Steel 12X18H10T” obtained by explosion welding. *Deformation and Fracture of Metals*. 2013;3:28-34. (In Russ.)
4. Didyk R.P., Kozechko V.A. Multilayer structures of increased crack resistance formed by explosion welding. *Automatic Welding*. 2015;2:54-57. (In Russ.)
5. Bataev I.A. Structure of explosively welded materials: experimental study and numerical simulation. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*. 2017;77(4):55-67. (In Russ.)
6. Patselov A.M., Lavrikov R.D., Gladkovskii S.V., Kamantsev I.S. Fracture toughness of Ti–Al3Ti–Al–Al3Ti laminate composites under static and cyclic loading conditions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015;2015(10):811-815. (In Russ.)
7. Minakov A.A., Plokhikh A.I. About the influence of deformation mechanisms on the increase of cyclic durability in multilayer steel materials. *Problems of mechanics of modern machines: Proceedings of the VII International Scientific Conference*. Ulan-Ude: Izd-vo VSGUTU. 2018;1:259-262. (In Russ.)
8. Minakov A.A., Titova A.S., Buketkin B.V. Investigation of multilayer steel materials behavior in low-cycle fatigue under alternating bending with strong loading. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. 2019;29:51-57. (In Russ.)
9. Tolochko N.K., Sokol O.V. Methodological aspects of the efficiency assessment of additive sheet lamination technology. *Machine Building Vestnik*. 2020;10:11-15. (In Russ.)

9. Толочко Н.К., Сокол О.В. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования // Вестник машиностроения. 2020. № 10. С. 11-15. EDN: SOIJSI

10. Толочко Н.К., Авраменко П.В., Кравцов В.Б., Левшуков А.П. Опыт сотрудничества БГАТУ и МЗШ в области производства сельхозтехники // Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: Материалы Международной научно-практической конференции (Минск, 16-17 октября 2024 г.: В 2 ч. Ч. 2. Минск: БГАТУ, 2024. С. 26-27. EDN: NDKFRO

11. Клевцов Г.В., Мерсон Д.Л., Клевцова Н.А. и др. Кинетика и механизм усталостного разрушения образцов из сталей 40X и 38X2H2MA // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2019. № 1 (47). С. 30-36. EDN: ADBGV

12. Попелюх А.И., Попелюх П.А., Батаев А.А. Особенности зарождения и роста усталостных трещин в стали при многократном динамическом сжатии // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117, № 3. С. 291. EDN: VRXUPX

13. Walczyk D.F., Dolar N.Y. Bonding Methods for Laminated Tooling. International Solid Freeform Fabrication Symposium. USA, 1997. Pp. 211-221. <http://hdl.handle.net/2152/70344>

14. Толочко Н.К., Сокол О.В. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности // Агропанорама, 2019. № 2. С. 12-16. EDN: IZNMWY

Информация об авторах

¹ Толочко Николай Константинович, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры технологий и организации технического сервиса; n.tolochko1951@mail.ru; AuthorID: 251868

² Авраменко Павел Викторович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и инженерной графики; minsk888@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>; SPIN-код: 7336-3717, AuthorID: 1102082

³ Кравцов Вячеслав Борисович, старший преподаватель кафедры технологий и организации технического сервиса; kravcovslava@tut.by

⁴ Голиницкий Павел Вячеславович, канд. техн. наук, доцент; gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>; SPIN-код: 2323-0797, AuthorID: 784381

^{1,2,3} Белорусский государственный аграрный технический университет; 220012, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 99

⁴ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Н.К. Толочко – формулирование основной концепции исследований и задач, разработка методологии исследований, создание окончательной версии (доработка) рукописи;

П.В. Авраменко – участие в анализе данных литературы и подготовке начального варианта текста;

В.Б. Кравцов – сбор, подготовка и первичный анализ данных литературы;

П.В. Голиницкий – участие в подготовке окончательной версии статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 13.12.2024, после рецензирования и доработки 23.04.2025; принята к публикации 24.04.2025

10. Tolochko N.K., Avramenko P.V., Kravtsov V.B., Levshukov A.P. Experience of cooperation between BGATU and MHS in the field of agricultural machinery production. *Technical and personnel support of innovative technologies in agriculture: mater. International scientific-practical conf.* (Minsk, October 16-17, 2024). Minsk: BGATU, 2024;2:26-27. (In Russ.)

11. Klevtsov G.V., Merson D.L., Klevtsova N.A. et al. Kinetics and mechanism of fatigue failure of samples from 40X and 38X2H2MA steels. *Vector of Science TSU*. 2019;1(47):30-36. (In Russ.)

12. Popelyukh A.I., Popelyukh P.A., Bataev A.A. Features of nucleation and growth of fatigue cracks in steel under repeated dynamic compression. *Physics of Metals and Metallurgy*. 2016;117(3):291. (In Russ.)

13. Walczyk D.F., Dolar N.Y. Bonding Methods for Laminated Tooling. *Proc. Solid Freeform Fabrication Symp.* Austin, Texas, USA, 1997:211-221.

14. Tolochko N.K., Sokol O.V. Additive technologies: the problem of stepped surface relief. *Agropanorama*. 2019;2:12-16. (In Russ.)

Author Information

Nikolay K. Tolochko¹, DSc (Phys-Math), Professor, Professor of the Department of Technical Service Technologies and Organization; n.tolochko1951@mail.ru

Pavel V. Auramenka², CSc (Eng), Associate Professor, Head of the Standardization, Metrology and Engineering Graphics Department; minsk888@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8420-3977>

Vyacheslav B. Kravtsov³, Senior Lecturer of the Department of Technical Service Technologies and Organization; kravcovslava@tut.by

Pavel V. Golinitzkiy⁴, CSc (Eng), Associate Professor; gpv@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7303-1658>; Scopus Author ID: 57216809753; Researcher ID: AAD-6305-2022

^{1,2,3} Belarusian State Agrarian Technical University; 220012, Republic of Belarus, Minsk, Nezavisimosti Ave., 99

⁴ Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49

Author Contribution

N.K. Tolochko – conceptualization, methodology, writing – review and editing of the manuscript;

P.V. Auramenka – visualization, description of results, conclusions;

V.B. Kravtsov – data verification; software;

P.V. Golinitzkiy – writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 13.12.2024; Revised 23.04.2025; Accepted 24.04.2025