

УДАРНАЯ ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Н.К. Толочко,

профессор каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ, докт. ф.-м. наук, профессор

П.В. Авраменко,

зав. каф. стандартизации, метрологии и инженерной графики БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

В.Б. Кравцов,

ст. преподаватель каф. технологий и организации технического сервиса БГАТУ

К.Ю. Астрейко,

начальник управления сельскохозяйственных машин ОАО «Минский завод шестерен»

В статье выполнен анализ результатов экспериментальных исследований механических свойств многослойных металлических структур, создаваемых по традиционным технологиям. Рассмотрены особенности создания подобных структур с повышенной ударной прочностью с использованием аддитивной технологии листового ламинирования.

Ключевые слова: многослойные металлические структуры, прочность, аддитивная технология листового ламинирования.

The analysis of experimental studies results of mechanical properties of multilayer metal structures created using traditional technologies are given in the article. The features of creating such structures with increased impact strength using additive sheet lamination technology are considered.

Key words: multilayer metal structures, strength, additive sheet lamination technology.

Введение

Аддитивные технологии позволяют создавать детали машин из различных материалов. Поскольку большинство деталей являются металлическими, то практический интерес представляют в первую очередь такие аддитивные технологии, которые позволяют создавать детали непосредственно из металлов [1]. Особое место занимает аддитивная технология листового ламинирования (Sheet Lamination, SL), согласно которой детали получают путем пакетирования контурных выкроек из листовых металлов и их соединения между собой разными способами – болтами, клеем и т.д. [2]. Особенность SL-технологии состоит в том, что получаемые с ее помощью металлические детали имеют многослойную (слоистую) структуру (SL-МС), обладающую прочностными свойствами, отличающимися ее от монолитной структуры обычных деталей.

В последние годы проведен ряд исследований ударной прочности подобных металлических многослойных структур, создаваемых по традиционным технологиям (Т-МС). Данные структуры получают из листовых металлических заготовок, соединяемых между собой горячей пакетной прокаткой, сваркой взрывом или давлением, включая диффузионную

сварку. Их соединяют также с помощью механического крепежа или клея (как и в случае SL-МС). Т-МС могут состоять из слоев одного и того же металла или из чередующихся слоев двух разных металлов. Наиболее полно такие исследования описаны в работах Власовой Д.В. [3], Каманцева И.С. [4], Саркеевой А.А. [5-7], Кутеневой С.В. [8], Батаева И.А. [9], выполненных в последние 10-15 лет.

Целью данной статьи является анализ результатов экспериментальных исследований ударной прочности металлических Т-МС-образцов и оценка возможности создания металлических SL-МС-деталей с повышенной ударной прочностью.

Основная часть

Т-МС-образцы

Для исследования ударной прочности Т-МС-образцы подвергают испытаниям на ударный изгиб (ИУИ), которые проводят согласно ГОСТ 9454-78. Обычно образцы содержат 5-20 слоев, толщиной в единицы – десятые доли миллиметров [3-5; 8, 10], но иногда они состоят из сотен слоев, толщина которых составляет десятки – единицы микрометров [3], и имеют форму вытянутого параллелепипеда, с V- или U-образным надрезом (концентратором напряжений),

сделанным на стороне, обратной той, на которую направлен удар. Причем линия надреза может проходить как перпендикулярно, так и параллельно плоскостям слоев. Размеры надрезов для разных образцов устанавливают согласно ГОСТ 9454-78 [5, 6; 8; 11], в отдельных случаях – ГОСТ 6996-66 [4].

При проведении испытаний на ударный изгиб используют разные ориентации слоев («разветвляющую» трещину Р и «тормозящую» Т), когда слои, соответственно, параллельны или перпендикулярны направлению роста трещин, т.е. направлению удара (рис. 1) [3-5; 8; 11]. При проведении ИУИ определяют ударную вязкость (КС) [3-5; 8; 11], а также строят диаграммы ударного нагружения, на основе которых вычисляют полную работу разрушения образца A и ее составляющие – работу зарождения трещины A_z и работу распространения трещины A_p [5; 8]. Кроме того, выполняют металлографический и фрактогра-

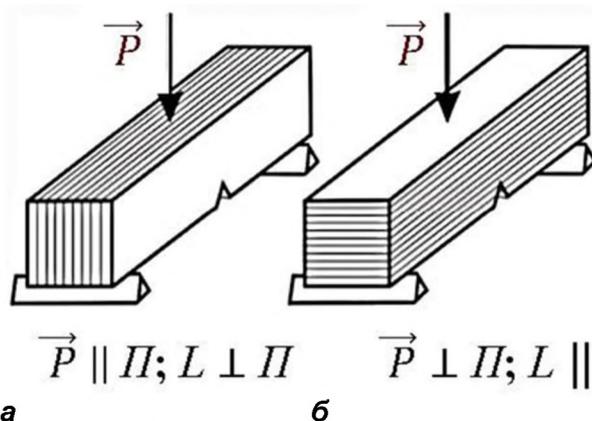


Рисунок 1. Схемы испытания Т-МС-образцов на ударный изгиб. Ориентация слоев: «разветвляющая» (а) и «тормозящая» (б) трещину; \vec{P} – сила удара; L – линия надреза; Π – плоскость слоя

фический анализ изломов [4, 5; 8; 10, 11].

Анализ результатов ИУИ показывает, что КС Т-МС-образцов зависит от ряда конструктивных факторов, рассмотренных ниже (поскольку КС зависит от температуры испытываемых образцов, то анализировались результаты тех ИУИ, которые проводились при комнатной температуре).

1. Ориентация слоев. КС Т-МС-образцов с Т-ориентацией слоев больше, чем с Р-ориентацией [3-5; 8; 10]. Так, для Т-МС-образцов, полученных сваркой взрывом 21-го слоя толщиной 1 мм из стали 20, КС при Т-ориентации слоев в 2,3 раза больше, чем при Р-ориентации. При этом для монолитного образца КС в 1,3 раза меньше, чем для Т-МС-образца с Т-ориентацией слоев, и в 1,8 раза больше, чем для Т-МС-образца с Р-ориентацией [9]. Такие различия КС для Т-МС-образцов с разной ориентацией слоев объясняются особенностями механизмов их разрушения [3-5; 8; 10]. При Р-ориентации слоев КС сравнительно мала, поскольку работа разрушения затрачи-

вается на раскрытие границ раздела слоев с образованием трещин расслоения, сами же слои не разрушаются. При Т-ориентации слоев границы их раздела служат барьерами на пути распространения трещины. После того как трещина зародилась в первом слое и прошла через него, для ее дальнейшего развития во втором слое требуется ее повторное зарождение в нем, для чего необходима дополнительная энергия. Кроме того, трещина, выйдя на границу раздела слоев, приостанавливается на этой границе, ее траектория резко изменяется и далее она идет по этой границе, т.е. происходит частичное расслоение образца, для чего также нужна дополнительная энергия. Таким образом, процесс развития трещины в Т-МС-образце с Т-ориентацией слоев представляет собой акты – «разрушение слоя – расслоение на межслойной границе», которые происходят последовательно, слой за слоем, что в целом вызывает увеличение КС. При этом нередко Т-МС-образцы разрушаются не полностью, а частично: трещина рассекает лишь несколько слоев в направлении ударного воздействия, затем ее движение прекращается.

2. Прочность соединения слоев. Поскольку при ударном воздействии Т-МС-образцы и с Р-, и с Т-ориентацией слоев подвергаются расслоению, то работа разрушения образцов зависит от прочности соединения слоев. Так, для композитных Т-МС-образцов с Т-ориентацией слоев из сталей 09Г2С и ЭП678, полученных горячей пакетной прокаткой, КС выше, чем для аналогичных образцов, сваренных взрывом [4; 8]. Это связано с менее прочными границами раздела слоев в горячекатаных образцах, вследствие чего облегчается расслоение образцов при разветвлении трещины вдоль границ раздела, и тем самым замедляется рост трещины в направлении удара, т.е. повышается КС. В свою очередь, в сварных образцах на межслойных границах траектория трещины отклоняется незначительно, не вызывая существенного расслоения образцов, что приводит к снижению КС. Как следствие, в горячекатаных образцах ударному разрушению подвергаются не все слои, а только часть слоев, расположенных с фронтальной стороны образцов, непосредственно подвергаемой удару, в то время как в сварных образцах трещина проходит почти через все слои. Подобная ситуация имеет место в испытаниях [10], когда монолитный стальной образец ломается, а Т-МС-образец, состоящий из однородных стальных слоев, лишь изгибается так, что энергия удара расходуется в основном на разрушение сварных швов и расклепывание шпилек, соединяющих слои, а также на деформацию самих слоев.

3. Количество и толщина слоев. Для Т-МС-образцов с Т-ориентацией КС увеличивается с увеличением количества слоев n (при соответствующем уменьшении их толщины h , если размеры образца фиксированы). Это связано с тем, что при ударном воздействии границы раздела слоев являются барье-

SL-МС-детали

рами на пути распространения трещины в направлении удара [3, 4; 6]. При этом энергия удара тратится на зарождение и распространение трещины не только в каждом очередном слое, когда трещина проходит сквозь слой в направлении удара, но и на каждой границе раздела, когда ответвления трещины идут вдоль границ, т.е. перпендикулярно направлению удара [6]. В отличие от Т-МС-образцов с Т-ориентацией слоев, в аналогичных Т-МС-образцах с Р-ориентацией слоев КС при увеличении n не увеличивается, а наоборот, уменьшается. Так, в Т-МС-образцах с Р-ориентацией слоев, полученных диффузионной сваркой слоев титанового сплава ВТ6, при увеличении n в 3,7 раза (с 3 до 11) КС уменьшается в 1,2 раза (с 0,81 до 0,66 МДж/м²) [6].

Следует отметить, что проводившиеся до сих пор ИУИ не позволяют достаточно полно судить об особенностях влияния n на КС, поскольку в них не определяются зависимости КС(n), для получения которых необходимы многократные испытания специально приготовленных МС-образцов с разными значениями n . Вместо этого обычно сравнивают КС двух образцов с разным значением n .

Например, в образцах, полученных диффузионной сваркой слоев Тi-сплава ВТ6, с увеличением n в 1,9 раза – от 7 до 13 (при уменьшении h в 1,9 раза – от 1,5 до 0,8 мм) КС увеличивается в 1,2 раза – от 0,47 до 0,56 МДж/м² [6].

В композитных образцах, полученных горячей пакетной прокаткой слоев из сталей 08х18 и 08х18Н10, с увеличением n в 15 раз – со 100 до 1500 (при уменьшении толщины слоев в 20 раз – от 100 мкм до 5 мкм) КС увеличивается в 1,9 раза – от 1,4 до 2,6 МДж/см² [3].

Рассмотрим особенности создания SL-МС-деталей с повышенной ударной прочностью с учетом влияющих на нее конструктивных факторов, описанных выше при анализе результатов ИУИ Т-МС-образцов.

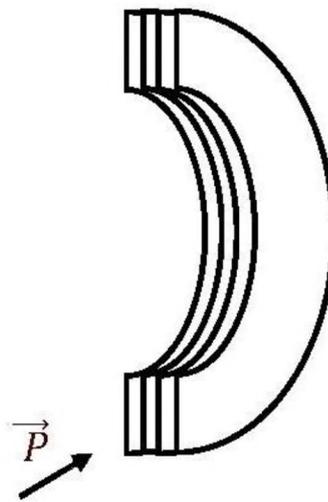
1. Ориентация слоев. При проектировании SL-МС-деталей, эксплуатируемых в условиях ударных воздействий, важно выбрать такое направление расслаивания 3D-модели, при котором достигается наибольшая КС. Для Т-МС-образцов этому требованию отвечает Т-ориентация слоев, при которой направление удара перпендикулярно плоскости слоев. Соответственно, для SL-МС-деталей следовало бы обеспечить такую ориентацию слоев, чтобы, с учетом пространственного положения конкретной детали в конструкции машины во время эксплуатации, направление ударных воздействий также было перпендикулярно плоскости слоев. Однако это требование не всегда выполнимо в силу определенных конструкторско-технологических причин.

В Белорусском государственном аграрном техническом университете (совместно с Минским заводом шестерен) изготовлен грядиль оборотного плуга с применением SL-технологии. На рис. 2а изображен внешний вид SL-МС-грядиля (указан стрелкой) в составе плуга во время полевых испытаний.

Грядиль состоит из пакета стальных листовых выкоек, стянутых болтами. Во время эксплуатации на каменистых почвах, характерных для Беларуси, плуг часто сталкивается с камнями. Соответствующие ударные воздействия сообщаются грядилю, их направление указано стрелкой на рис 2б и 2в, где

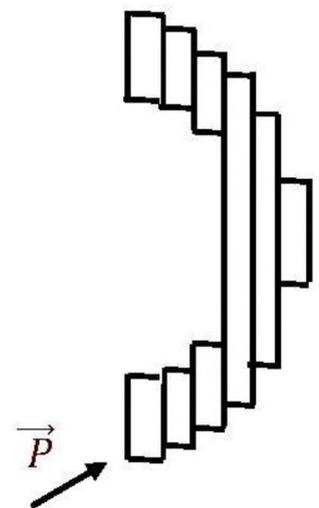


а



$\vec{P} \parallel \Pi; L \perp \Pi$

б



$\vec{P} \perp \Pi; L \parallel \Pi$

в

Рисунок 2. SL-МС-грядиль: внешний вид (а) и схемы конструкции с РТ (б) и ТТ (в) ориентацией слоев

представлены две схемы многослойной конструкции грядила с разной (Р- и Т-) ориентацией слоев. Для повышения КС слои грядила должны иметь Т-ориентацию (рис. 2 в), как у Т-МС-образцов, при проведении ИУИ, но в этом случае на поверхности грядила при его изготовлении образуется нежелательный ступенчатый рельеф, ухудшающий качество его работы. Рельеф возникает в силу послойного характера построения деталей, присущего аддитивным технологиям, включая SL-технологию [12]. Для сглаживания рельефа необходимо проводить специальную постобработку, что увеличивает длительность и стоимость изготовления грядила. Поэтому предпочтительно создавать грядиль с Р-ориентацией слоев (рис. 2б), так как при этом образование рельефа в принципе исключается. Для предотвращения возможного расслаивания выкоек грядила из-за ударных воздействий во время работы плуга достаточно будет крепче стянуть их болтами.

2. Прочность соединения слоев. В отличие от Т-МС-образцов, получаемых вырезкой из листовых слоистых заготовок, предварительно приготовленных путем пакетирования и соединения между собой исходных листовых металлов, SL-МС-детали создают пакетированием и соединением между собой выкоек, предварительно вырезанных из исходных листовых металлов.

Поэтому, если для соединения исходных листовых металлов при изготовлении заготовок Т-МС-образцов широко применяют горячую прокатку и сварку взрывом или давлением, то для соединения металлических выкоек при изготовлении SL-МС-деталей эти методы неприменимы, поскольку могут вызывать нежелательные деформации выкоек, собранных в пакеты, и тем самым искажать заданные размеры и форму изготавливаемых деталей. Чаще всего в изготавливаемых SL-МС-деталях для соединения выкоек используют механический крепеж (болты, шпильки, заклепки и т.п.) или клей [13]. Соответственно, прочность получаемых такими способами межслоевых соединений

будет влиять на КС SL-МС-деталей, что следует учитывать при определении допустимых условий их эксплуатации. Так, при механическом соединении слоев ударные воздействия могут вызывать деформирование, разрыв или вырыв крепежных деталей [11], в то время как отверстия в слоях под крепежные детали могут играть роль концентраторов напряжений, провоцирующих развитие ударных трещин. В свою очередь, при клеевом соединении слоев возможны различные соотношения между адгезионной прочностью клеевых прослоек и когезионной прочностью слоев. Например, при испытаниях на разрыв клеевых SL-МС наблюдались случаи, когда прослойки из высокопрочных клеев оставались неповрежденными, в то время как в слоях из алюминиевых сплавов возникали разрывы [13].

3. Количество и толщина слоев. Увеличение n при изготовлении SL-МС-деталей с Т-ориентацией слоев, как отмечалось выше, не всегда оправдано в силу определенных конструкторско-технологических причин (даже если учесть, что при этом сглаживается нежелательный ступенчатый рельеф за счет соответствующего уменьшения h [12]). Кроме того, это может быть не всегда оправдано по определенным производственно-экономическим причинам. Увеличение n приводит к увеличению длительности и стоимости изготовления деталей, поскольку приходится делать больше листовых выкоек, которые затем надо пакетировать и соединять между собой. Таким образом, при изготовлении SL-МС-деталей следует подбирать оптимальные сочетания значений n и h .

Рассмотренные выше отличительные особенности изготовления и структурных свойств Т-МС-образцов и SL-МС-деталей приведены в табл. 1.

Как упоминалось ранее, при анализе результатов ИУИ Т-МС-образцов используются энергетические параметры процесса ударного разрушения, в частности, полная работа разрушения образца A , работа зарождения трещины A_3 и работа распространения тре-

Таблица 1. Отличительные особенности изготовления и структурных свойств Т-МС-образцов и SL-МС-деталей

Т-МС-образцы	SL-МС-детали
При изготовлении Т-МС-образцов направление расслаивания 3D-модели выбирается исходя из условия обеспечения наибольшей КС	При изготовлении SL-МС-деталей направление расслаивания 3D-модели выбирается исходя из условия обеспечения не только наибольшей КС, но также предотвращения формирования или сглаживания ступенчатого рельефа
При изготовлении Т-МС-образцов исходные листы металла соединяют горячей прокаткой и сваркой взрывом или давлением	При изготовлении SL-МС-деталей исходные листы металла соединяют механическим крепежом или клеем
Т-МС-образцы состоят из слитых воедино металлических слоев, образующих сплошную квазимонолитную металлическую структуру	SL-МС-детали состоят из дискретных металлических слоев, разделенных зазорами или клеевыми прослойками
Для Т-МС-образцов с Т-ориентацией увеличение количества слоев приводит к увеличению КС	Для SL-МС-деталей с Т-ориентацией увеличение количества слоев приводит к увеличению КС, а также к сглаживанию ступенчатого рельефа, увеличению длительности и стоимости изготовления деталей

шины A_p , связанные между собой следующим простым уравнением (Дж) [5; 8]:

$$A = A_3 + A_p. \quad (1)$$

Эти же параметры можно использовать и при разработке подходов к проектированию и изготовлению SL-МС-деталей.

Если предположить, что зависимость $KС(n)$ является линейной, т.е. $KС = kn$, где $k = \text{const}$, то для случая оценки ударной прочности SL-МС-детали уравнение (1) можно представить в общем случае в следующем расширенном виде:

$$A_n = n (A_{3(a)} + A_{p(a)}) + A_b, \quad (2)$$

где A_n – полная работа разрушения SL-МС-детали, состоящей из n слоев;

$A_{3(a)}$ и $A_{p(a)}$ – работа, затраченная, соответственно, на зарождение и распространение трещины в одном слое;

A_b – работа разрушения межслойных связей.

Если слои соединены между собой с помощью механического крепежа, то работа A_b идет на деформирование, разрыв или вырыв крепежных деталей (например, болтов).

Если слои соединены между собой с помощью клея, то работу A_b можно представить в виде:

$$A_b = (n - 1) (A_{3b} + A_{pb}), \quad (3)$$

где A_{3b} и A_{pb} – работа, затраченная, соответственно, на зарождение и распространение трещины в одной клеевой прослойке;

$(n - 1)$ – количество прослоек.

Для каждой конкретной SL-МС-детали вклад, вносимый в общую работу разрушения A_n ее составляющими $A_{3(a)}$ и $A_{p(a)}$, а также A_b (или A_{3b} и A_{pb}), будет различным, с учетом прочностных свойств слоев и межслойных соединений.

С помощью уравнений (2) и (3) можно давать лишь весьма приближенную оценку ударной прочности SL-МС-деталей, исходя из предположения, что зависимость $KС(n)$ является линейной. В действительности же, как показал выполненный анализ результатов исследований ударной прочности металлических Т-МС-образцов, характер этой зависимости до сих пор не исследован. В разных случаях она может иметь разный вид, в том числе нелинейный. Поэтому экспериментальное определение характера этой зависимости, т.е. вида функции $KС = f(n)$, является одной из первостепенных задач дальнейших исследований прочностных свойств металлических многослойных структур, в том числе SL-МС-деталей.

Заключение

Металлические многослойные структуры обладают повышенной ударной прочностью, поэтому на их основе перспективно создавать детали машин и различных механических устройств, работающих в условиях ударных воздействий. В частности, благо-

даря повышенной ударной прочности, металлические многослойные структуры можно использовать при создании рабочих органов почвообрабатывающих машин, подвергающихся ударным воздействиям со стороны находящихся в почве каменных и древесных включений.

Для изготовления деталей со слоистой структурой, характеризующихся сложной формой, прежде всего в условиях единичного и мелкосерийного производства, особенно эффективное применение может найти аддитивная технология листового ламинирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Толочко, Н.К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Вестник машиностроения. – 2020. – № 10. – С.11-15.
3. Власова, Д.В. Разработка многослойного стального материала с высоким запасом вязкости разрушения при низких температурах: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 02.06.17/ Д.В. Власова. – Москва, 2022. – 18 с.
4. Каманцев, И.С. Сопротивление разрушению и сопутствующие росту трещин явления в монолитных и слоистых металломатричных композиционных материалах: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / И.С. Каманцев. – Екатеринбург, 2019. – 138 с.
5. Поведение при ударном нагружении слоистого материала из титанового сплава / А.А. Саркеева [и др.] // Физическая мезамеханика. – 2012. – № 5. – С. 51-57.
6. Саркеева, А.А. Особенности получения и ударного разрушения слоистого материала на основе титанового сплава ВТ6 / А.А. Саркеева // Letters on Materials. – 2020. – № 10. – С. 345-350.
7. Саркеева, А.А. Механическое поведение слоистого материала из титанового сплава ВТ6 при ударном нагружении: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.16.09. 2013 / А.А. Саркеева. – Уфа, 2013. – 20 с.
8. Кутенева, С.В. Структура и свойства полученных сваркой взрывом и пакетной прокаткой слоистых композитов на основе низкоуглеродных сталей, меди, алюминия и его сплавов: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09 / С.В. Кутенева. – Екатеринбург, 2018. – 145 с.
9. Батаев, И.А. Структура и механические свойства многослойных материалов, сформированных по технологии сварки взрывом тонколистовых заготовок из низкоуглеродистой стали: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.16.09 / И.А. Батаев. – Новосибирск, 2010. – 19 с.
10. Мирзаев, Д.А. Моделирование разрушения ферритной стали с неоднородной структурой / Д.А. Мирзаев, И.Л. Яковлева, Н.А. Терещенко // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – № 3. – С. 53-59.

11. Ложкин, В.С. Структура и механические свойства многослойных материалов, получаемых сваркой взрывом тонколистовых пластин из мартенситностареющей, хромоникелевой аустенитной и низкоуглеродистой сталей: дис ... канд. техн. наук: 05.16.09 / В.С. Ложкин. – Новосибирск, 2014. – 198 с.

12. Толочко, Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толоч-

ко, О.В. Сокол // Агропанорама. – 2019. – № 2. – С. 12-16.

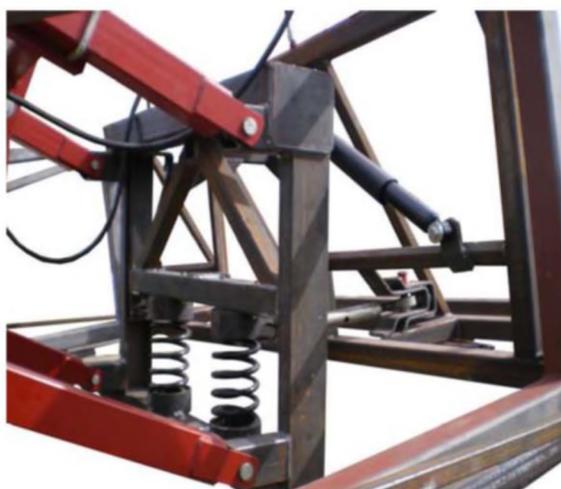
13. Прямое изготовление металлических деталей с применением LOM-технологии / Н.К. Толочко [и др.] // Литье и металлургия. – 2018. – № 1. – С. 137-143.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 19.01.2024

Независимая навеска и система стабилизации штанги опрыскивателя «Мекосан-2500-18»

Предназначена для снижения амплитуды колебаний штанги и повышения надежности ее несущей конструкции.

Применение разработки позволяет эффективно гасить колебания штанги, возникающие вследствие движения колес опрыскивателя по неровности поверхности поля, что обеспечивает высокую равномерность распределения пестицидов по обрабатываемому объекту, а также повышение надежности несущей конструкции штанги.



Основные технические данные

Марка машины	Мекосан-2500-18
Производительность за 1 час времени, га:	
- сменного	10,9
- эксплуатационного	10,7
Система навески штанги на остов опрыскивателя	Независимая
Способ крепления рамки штанги к остову опрыскивателя	Параллелограммная навеска
Амплитуда колебаний краев штанги, м	до 0,1
Рабочая скорость движения, км/ч	9-12
Качество выполнения технологического процесса:	
- неравномерность распределения рабочей жидкости по ширине захвата, %, не более	15
- снижение неравномерности распределения рабочей жидкости по ширине захвата, %, не менее	5
Габаритные размеры опрыскивателя в транспортном положении, мм, не более	6045x2425x2215
Габаритные размеры опрыскивателя в рабочем положении (при высоте установки штанги 600 мм), мм, не более	6045x18250x2215
Дорожный просвет, мм	350
Увеличение массы опрыскивателя, кг	на 120