

ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ И ИНСТРУМЕНТА

*Сазонов М. И.¹, Ессипчук А. М.², Овчинников Е. В.³, Хвисевич В. М.¹,
Онысько С. Р.¹, Веремейчик А. И.¹, Хеук М. В.¹, Аббасов К. Т.¹*

- 1) Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь
- 2) Universidade Estadual Paulista «JЪLIO DE MESQUITA FILHO»;
г. Сан-Паулу, Бразилия
- 3) Гродненский государственный университет им. Янки Купалы;
г. Гродно, Республика Беларусь

Известно, что поверхностное плазменное упрочнение сталей является перспективным, но недостаточно изученным процессом термообработки [1–5]. Особый интерес представляют исследования температурных полей в зоне нагрева, скоростей нагрева и охлаждения металла при движущемся локальном источнике тепла. Согласно [1] воздействие высококонцентрированных источников нагрева на поверхность стальных изделий приводит к структурным, фазовым и аллотропическим превращениям в металле. В этой связи изучение влияния тепловых процессов на формирование упрочненного поверхностного слоя с целью получения оптимальных прочностных и износостойких свойств, обусловленных этими превращениями, представляет важную задачу. Для анализа теплофизических параметров в поверхностном слое металла необходимо подобрать оптимальные режимы процесса упрочнения, которые зависят главным образом от характеристик генератора плазмы: тока и напряжения дуги, вида защитного и плазмообразующего газов, расстояния от среза сопла плазмотрона до поверхности детали, скорости движения источника.

Для получения исходных данных для расчета и разработки плазмотронов проведены исследования напряженности электрического поля дуги, горящей в потоке различных газов [6, 7]. Кроме того, проводились исследования дуги в различных чистых газах при помощи плазмотрона с фиксированной длиной дуги и геометрически подобными электроразрядными камерами, причем внутренним электродом-катодом служил графитовый или вольфрамовый стержень длиной 10 мм и диаметром (3–6) мм, заделанным заподлицо в медную обойму. Величины напряженности электрического поля вдоль дуги E_H определены методом измерения потенциалов изолированных друг от друга секций [8]. Напряженность электрического поля дуги определялась по наклону кривой распределения потенциала вдоль оси z .

Установлено, что в исследованном диапазоне параметров зависимость напряженности электрического поля от тока – падающая, а вдоль дуги – практически постоянная.

Для сравнения электрического поля вдоль дуги в вихревых потоках различных газов на рисунке 1 приведены вольтамперные характеристики дуги при

$d = 10$ мм, $G = 4$ г/с. Эти результаты показывают, что наиболее эффективно нагрев газа дугой происходит в гелии.

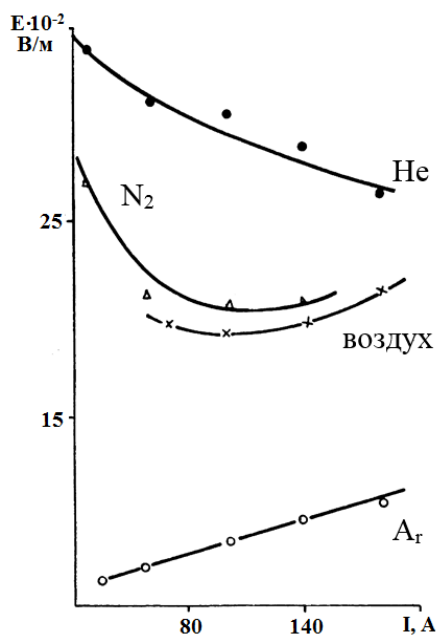


Рисунок 1 – Напряженность электрического поля дуги для различных газов

На основе теории подобия разработана методика расчета плазматронов для нагрева различных газов. Учитывая особенности горения дуги в различных газах, обобщенную зависимость напряженности электрического поля E_H от определяющих критериев для гелия на падающем участке можно представить следующим образом [6]:

$$E_H d = 560 \times \left(\frac{G}{d}\right)^{0,06} \times \left(\frac{d}{I}\right)^{0,37}, \quad (1)$$

и для аргона [7]:

$$E_H d = 4,2 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{G}{d}\right)^{0,11} \cdot \left(135 + 10^{-2} \frac{I}{d}\right) \cdot \left(0,9 + 1,6 \cdot 10^{-4} \frac{z}{d}\right), \quad (2)$$

где G – расход газа, d – диаметр разрядной камеры.

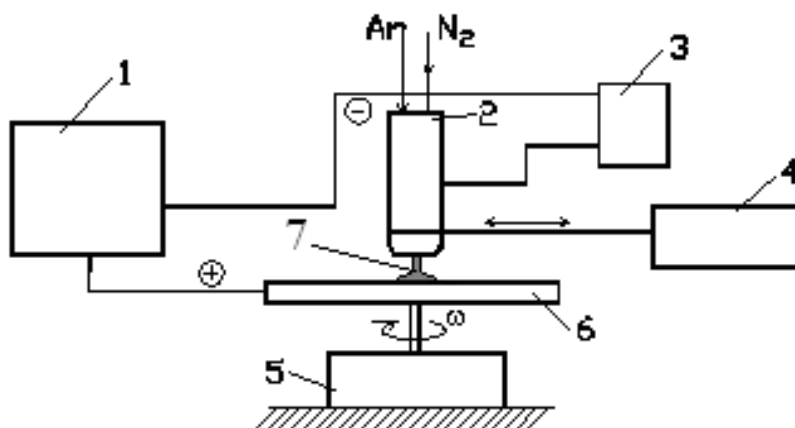
Для разработки методики поверхностного упрочнения стальных изделий при помощи движущейся плазменной дуги разработаны плазмотрон и экспериментальная установка (рисунок 2), необходимая для оценки влияния параметров плазменной дуги на поверхность образцов, оптимизации этих параметров, определения влияния режимов упрочнения на физико-механические свойства и износостойкость поверхностного слоя, изучения теплофизических процессов, происходящих в сталях в результате воздействия плазменной дуги, исследования микрорельефа поверхностного слоя в зависимости от параметров процесса упрочнения.

Установка, схема которой приведена на рисунке 3, состоит из силового источника питания дуги 1, плазмотрона постоянного тока 2, устройства ВЧ-поджига дуги 3, а также систем газоснабжения плазмотрона аргоном и азотом, системы водоохлаждения плазмотрона. Кроме того, создана система устройств,

реализующая плоскопараллельное движение упрочняемой детали относительно плазмотрона. Силовой источник питания обеспечивает горение дуги при напряжениях (14-35) В и при токах до 30 А.



Рисунок 2 – Фрагмент экспериментальной установки для поверхностного плазменно-дугового упрочнения стальных изделий



1 – силовой источник питания; 2 – плазмотрон; 3 – высокочастотный генератор; 4, 5 – манипуляторы; 6 – упрочняемая деталь; 7 – плазменная дуга

Рисунок 3 – Схема установки для плазменно-дуговой закалки

Поджиг дуги производится при помощи высоковольтного ВЧ-генератора 3, который подключен одним полюсом к катоду плазмотрона, другим – к его соплу. Перед запуском плазмотрона устанавливаются заданные расходы рабочего газа аргона и защитного газа азота. Кроме того, задается определенная скорость перемещения плазмотрона на основе предварительно проведенных экспериментов по упрочнению на образцах. Затем на плазмотрон подается напряжение от силового источника и включается ВЧ-генератор, который обеспечивает пробой газового зазора между катодом и соплом. В этот момент сопло служит поджигающим электродом. По образовавшемуся искровому каналу развивается дежурная дуга между катодом и соплом. Ток дуги ограничивается переменным сопротивлением R , которое включено в электрическую цепь между соплом и анодом, устанавливается в пределах (4–6) А и регулируется изменением величины R . Под действием потока аргона через плазмотрон слаботочная дуга выдувается из

плазмотрона и замыкается на анод-деталь. Приложенное напряжение к плазмотрону от силового источника обеспечивает загорание основной дуги между катодом и анодом, а дежурная дуга автоматически отключается.

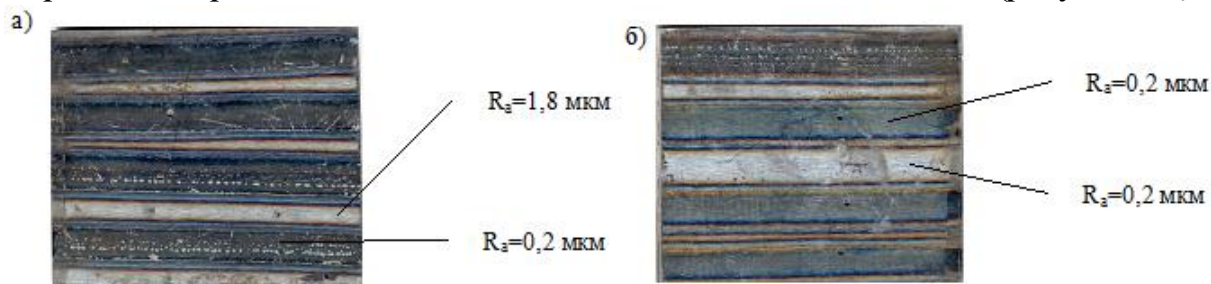
Проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при токах (7–30) А, при этом напряжение дуги составляет (14–35) В в зависимости от соотношения расходов аргона и азота. Аргон и азот в плазмотрон подаются из баллонов высокого давления через редукторы и вентили. Измерение расходов аргона и азота осуществляется с помощью ротаметров РМ–0.63 ГУЗ. Измерения расхода воды с целью определения теплового КПД плазмотрона производились при помощи мерного сосуда и секундомера, а температура холодной и нагретой в плазмотроне воды ртутным термометром. Для перемещения плазмотрона относительно закаливаемой детали используется манипулятор 4 (рисунок 3) с двигателем и магнитным роликом, который приводится во вращательное движение ротором. В свою очередь ролик катится по торцу модели закаливаемой детали 6. Кроме того, разработан и изготовлен специальный манипулятор 5, который непосредственно вращает упрочняемую деталь с заданной скоростью, причем угловая скорость детали может изменяться в пределах (0,5–180) об/мин при помощи разработанной электронной системы управления двигателем.

Для отработки методики процесса ППЗ в качестве материала для образцов выбрана сталь 45, свойства которой достаточно изучены при обработке лазером, микроплазменной дугой и другими методами [1, 2]. Этот факт позволяет оценить достоверность результатов поверхностного плазменно-дугового упрочнения с помощью разрабатываемого метода. Кроме стали 45, испытания проводились на образцах из хромистых сталей: конструкционной легированной 40Х и коррозионностойкой жаропрочной 14Х17Н2, и чугуна ВЧ100.

Для исследования свойств упрочненного поверхностного слоя применялись металлографический, фазовый, рентгеноструктурный анализы. Шероховатость *Ra* поверхностного слоя определялась с помощью измерительного комплекса с лазерным сканированием *Mistral 070705* фирмы *Brown&sharpe* с программным обеспечением *PC-dmis PRO Software*, позволяющего производить контроль в 3D с предоставлением протоколов контроля (точность измерения 0,003 мм). Исследования проводились на плоских образцах. Для определения влияния плазменной дуги на микроструктуру и свойства стали выполнен металлографический анализ для образцов с нанесенной плазменной дорожкой в форме параллелепипеда. Выделение образца осуществляли сечением перпендикулярно нанесенной дорожке.

Эксперименты показали, что поверхностное упрочнение сталей высококонцентрированным источником нагрева можно осуществлять с оплавлением и без оплавления поверхности (рисунок 4). Воздействие плазменной дуги на поверхность образца приводит к изменению микрогеометрии поверхности. При упрочнении в твердой фазе закалка металла происходит без оплавления и шерохова-

тость поверхности остается такой же, как и при механической обработке в исходном состоянии. С помощью системы *Mistral 070705* построена топография поверхности образцов из стали 45 без оплавления и с оплавлением (рисунок 4 а, б).

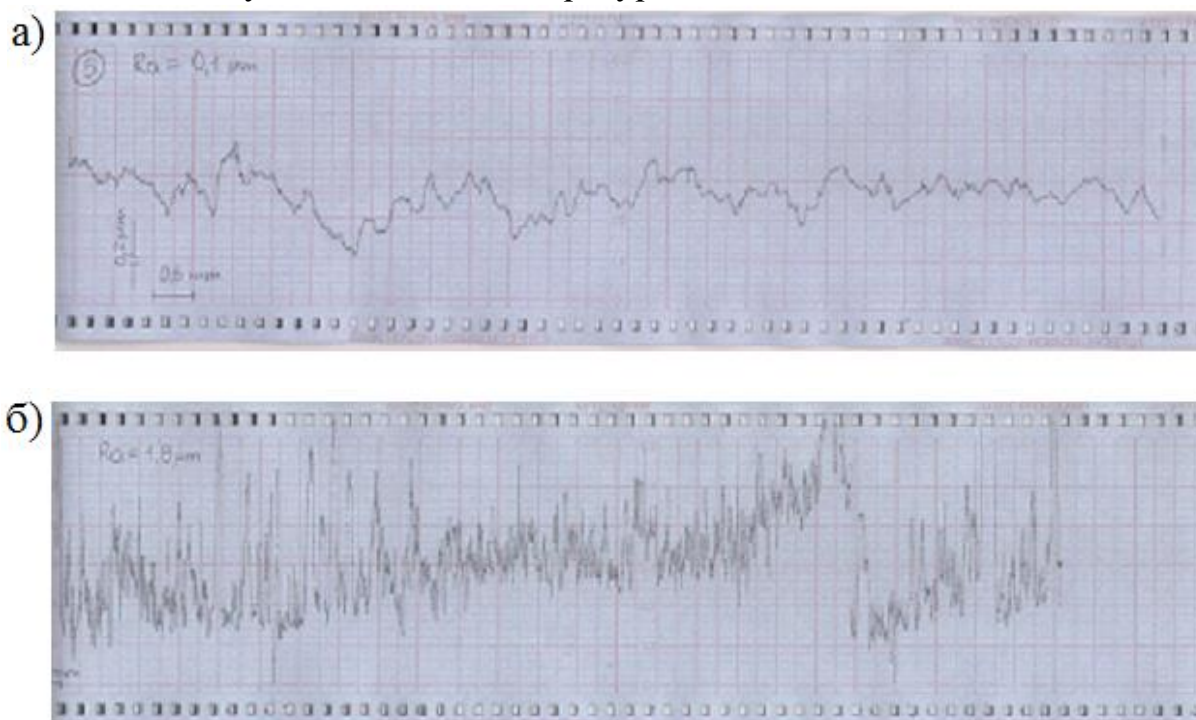


а) с оплавлением поверхности; б) без оплавления поверхности

Рисунок 4 – Микрогеометрия поверхности образцов после термообработки

Анализируя профилограммы, можно заключить, что шероховатость поверхности $Ra = 0,1$ мкм после механической обработки образцов сохраняется такой же и после обработки плазменной дугой.

Как видно из рисунка 5, поверхность образца с оплавлением имеет сложный рельеф, обусловленный системой впадин и гребней. По результатам экспериментальных исследований установлено, что при закалке поверхности в твердой фазе целесообразно применить аргон в качестве защитного газа, который в меньшей степени, чем азот, обжимает дугу. В результате снижается плотность потока энергии, которую поглощает поверхность, и температура поверхностного слоя металла получается ниже температуры его плавления.



а) без оплавления поверхности; б) с оплавлением поверхности

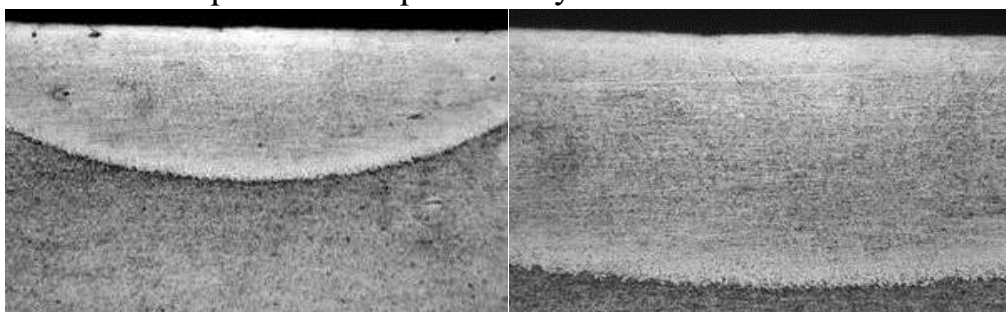
Рисунок 5 – Профилограмма поверхности образцов после термообработки

Согласно [5] плазменная закалка сталей без оплавления поверхности является наиболее распространенной, так как обеспечивает сохранение необходи-

мых качеств поверхности изделия (шероховатость), которые получены механической обработкой. В этом случае процесс ППЗ используется как финишная операция. Необходимые значения твердости, размеры зоны воздействия дуги и другие параметры можно регулировать в широких пределах. В случаях, когда для детали необходимо получить особенные эксплуатационные свойства или к шероховатости рабочей поверхности, не предъявляются высокие требования, используют ППЗ с оплавлением поверхности.

Большое влияние на изменение шероховатости поверхности оказывает ток дуги, скорость движения источника и объемы расхода газов. Эксперименты показали, что шероховатость поверхности в диапазоне (0,1–20) мкм для образцов из сталей 45, 40Х, 14Х17Н2 можно получать, варьируя процентным соотношением смеси защитных газов аргон-азот. Установлено, что при 30 % содержании азота и 70 % аргона в смеси термообработка происходит без оплавления поверхности, повышение же процентного содержания азота приводит к оплавлению поверхности (технологические параметры процесса: ток дуги $I = 26$ А, скорость перемещения источника $v = 11,7$ мм/с). Оплавление поверхности можно получить также, изменяя скорость движения источника при постоянстве других технологических параметров. Установлено, что наименьшая шероховатость поверхности $Ra = 0,1$ мкм получается при воздействии дуги в защитной 100 % среде аргона при $v = 11,7$ мм/с, $I = 26$ А.

Выполнен микроструктурный анализ сталей при термообработке образцов с использованием аргона и азота в качестве защитных газов. Типичная микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона приведена на рисунке 6. Зона влияния плазменной дуги имеет форму сегмента (рисунок 6а) и по своему строению аналогична зоне влияния при термообработке стали лазером и электронным лучом.



а) зона влияния плазменной дуги, $\times 45$, б) микроструктура зоны нагрева, $\times 180$

Рисунок 6 – Микроструктура поверхностного слоя стали 45 при термообработке в защитной среде аргона

Анализ фотографий микроструктуры упроченного приповерхностного слоя стали 14Х17Н2 показал, что при малой мощности плазмотрона $P = 440$ Вт зона упрочнения просматривается незначительно. При большем увеличении участка (рисунок 7) поверхностного слоя видна зона столбчатых кристаллов, ориентированных в направлении источника нагрева.

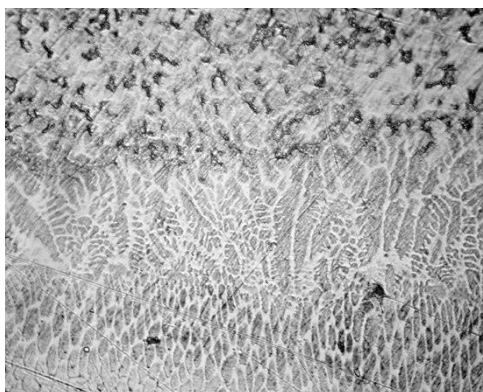
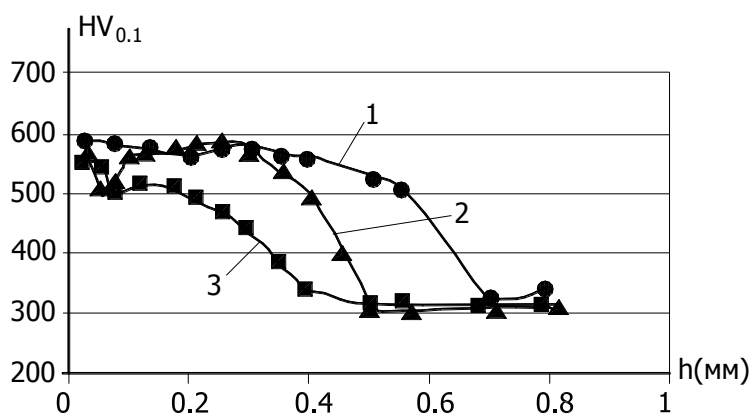


Рисунок 7 – Микроструктура стали 14X17H2 при термообработке в защитной среде аргона ($I = 15 \text{ A}$, $\times 765$)

Исследованы микротвердость поверхностного слоя образцов из различных сталей в зависимости от расхода аргона, тока дуги, скорости перемещения плазмотрона. На рисунке 8 представлено типичное распределение микротвердости по глубине.



1 – $P = 540 \text{ Вт}$, $I = 16 \text{ А}$; 2 – $P = 510 \text{ Вт}$, $I = 15 \text{ А}$; 3 – $P = 440 \text{ Вт}$, $I = 13 \text{ А}$
Рисунок 8 – Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине

По результатам проведенных экспериментов микротвердость составила (560–600) HV_{0.1}. Толщина упрочненного слоя может изменяться в зависимости от скорости упрочнения от 0,5 мм до 0,7 мм.

Таким образом, варьируя технологическими параметрами процесса поверхностного плазменно-дугового упрочнения, можно получить различную шероховатость поверхности с требуемыми характеристиками поверхностного слоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, Н. В. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин / Н. В. Спиридонов, О. С. Кобяков, И. Л. Куприянов – Минск : Вышэйшая школа, 1988. – 155 с.
2. Плазменное поверхностное упрочнение / Л. К. Легцинский [и др.]. – Киев : Техника, 1990. – 107 с.
3. Веремейчик, А. И. Плазменные технологии как одни из основных технологий повышения эксплуатационных свойств металлоизделий / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвишевич // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки : междунар. сб. науч. тр. / Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2008. – Вып. 2. – С. 6–12.

4. Davis, J. R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics // ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 319 p.
5. Сафонов, Е. Н. Плазменная закалка деталей машин : монография / Е. Ф. Сафонов / М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 116 с.
6. Веремейчик, А. И. Исследование электрической дуги в потоке гелия в сильноточном плазмотроне / А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, Д. Л. Цыганов // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 5. – С. 99–102.
7. Батрак, В. В. Исследование электрической дуги в потоке аргона / В. В. Батрак, А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2008. – № 4 : Машиностроение. – С. 26–28.
8. Даутов, Г. Ю. Напряженность электрического поля в стабилизированной вихрем дуге / Г. Ю. Даутов, М. И. Сазонов // ПМТФ. – 1967. – № 4. – С. 127–131.

УДК 621.926

ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДНЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОВАЛКОВОГО АГРЕГАТА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИЛЬВИНИТА

Сотник Л. Л., Дремук В. А., Винничек К. С.

Барановичский государственный университет,
Барановичи, Республика Беларусь

Введение. Внедрение вибротехники в промышленности осуществляется достаточно высокими темпами, так как существующие средства механизации оказались неконкурентоспособными с новой вибрационной техникой [1, 2].

В вибрационных машинах параллельно идут процессы деформирования при знакопеременном или пульсационном нагружении и перемещения в условиях периодических силовых воздействий [1].

Большое значение имеет равномерное распределение материала по ширине рабочих органов. В связи с наличием различных по величине и форме кусков материала объем рабочего пространства в валковых агрегатах используется не в полной мере. При создании вибрационного воздействия материал занимает рабочее пространство более равномерно, повышая тем самым производительность агрегата.

Вибрация разрушает или ослабляет связи в дисперсных средах: под воздействием вибраций различных интенсивностей дисперсные среды переходят в состояние псевдооживления и так называемого виброоживления. При воздействии вибрации легче преодолеваются силы сухого и вязкого трения, снижаются предел пластического деформирования и вязкость [1].

При динамическом нагружении материала возникающие в нем напряжения вдвое больше, чем при статическом [3]. При ударе сила сжатия возникает в определенном сечении так быстро, что трещина образуется до того, как в частице материала устанавливается равновесное распределение энергии, результатом