

Ружьев В.А.¹, кандидат технических наук, доцент;

Калинин А.Б.¹, доктор технических наук, доцент;

Теплинский И.З.¹, кандидат технических наук, профессор;

Ловкис В.Б.², кандидат технических наук, доцент

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», г. Пушкин, Российская Федерация

² Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь

ЗНАКОПЕРЕМЕННАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В ВОПРОСЕ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОЧВОРЕЖУЩУЮ ЧАСТЬ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Аннотация. В статье рассматривается взаимосвязь между физикой знакопеременного деформирования металлов, в частности эффектом Баушингера, и технологиями упрочнения рабочих органов сельскохозяйственной техники. Проанализированы механизмы изменения механических свойств материалов при циклических нагрузках и влияние термической обработки на эти процессы. На основе патентных данных предложены рекомендации по оптимизации параметров наплавки износостойких покрытий с учетом остаточных напряжений и структурных превращений в зоне термического влияния.

Abstract. This article examines the relationship between the physics of alternating metal deformation, specifically the Bauschinger effect, and hardening technologies for agricultural machinery. The mechanisms underlying changes in the mechanical properties of materials under cyclic loads and the influence of heat treatment on these processes are analyzed. Based on patent data, recommendations are proposed for optimizing the deposition parameters of wear-resistant coatings, taking into account residual stresses and structural transformations in the heat-affected zone.

Ключевые слова. эффект Баушингера, знакопеременная деформация, износостойкое покрытие, рабочие органы почвообрабатывающих машин, наплавка, остаточные напряжения.

Key words. Bauschinger effect, alternating deformation, wear-resistant coating, working parts of tillage machines, surfacing, residual stresses.

Эксплуатация почвообрабатывающих машин сопряжена с интенсивным абразивным износом рабочих органов, таких как диски борон и лемехи плугов. Традиционные методы повышения твердости поверхности не всегда обеспечивают долговечность из-за сложного характера нагрузок, включающего ударные воздействия и циклическое изменение знаков напряжений в процессе взаимодействия с уплотненным слоем почвы. В связи с этим актуальной становится изучение поведения материала не только под статической нагрузкой, но и в условиях знакопеременного деформирования [1, 2, 3]. Одним из ключевых физических явлений, опреде-

ляющих сопротивление материала повторному нагружению противоположного знака, является *эффект Баушингера*. Понимание природы данного эффекта позволяет корректировать технологические процессы нанесения защитных покрытий для максимизации ресурса деталей.

Эффект Баушингера, суть которого заключается в том, что после нагружения в одном направлении сопротивление материала малым пластическим деформациям при нагружении в обратном направлении снижается. Это проявляется в уменьшении пределов упругости и текучести при смене знака нагрузки.

Исследования на примере конструкционных сталей демонстрируют, что характер упрочнения или разупрочнения зависит от схемы нагружения [3, 4, 5]. При циклическом изгибе без промежуточной обработки наблюдается разупрочнение в зоне локализованной деформации. Однако применение термической обработки (отпуска) между циклами устраняет эффект Баушингера и способствует интенсивному упрочнению. В частности, нагрев до 300°C приводит к полигонизации субструктуры зерен, что повышает предел текучести до уровня предела прочности.

Важно отметить, что при сдвиговой деформации механизм упрочнения действует независимо от реверсивности нагружения, и эффект Баушингера не фиксируется. Это указывает на то, что дислокационные механизмы могут по-разному активироваться в зависимости от типа напряженного состояния. Для рабочих органов с.-х. машин, испытывающих комплексное нагружение (изгиб, удар, трение), учет этих различий критически важен при выборе режимов упрочнения.

Существующие методы восстановления и упрочнения почворежущих деталей часто используют наплавку [6, 7, 8]. Однако сплошное покрытие может приводить к перегреву тонкостенных элементов и короблению. Перспективным решением является дискретное нанесение износостойкого материала.

Анализ патентных решений показывает эффективность способа, включающего дуговую наплавку точек износостойким присадочным материалом большей плотности, чем основа детали [9, 10]. Ключевыми параметрами данной технологии являются: расположение точек вдоль линий армирования, параллельных режущей кромке; расстояние от кромки до линии армирования, равное ширине заточки рабочей грани, имеющей напряжения сжатия; шаг между линиями армирования не более трех диаметров точек; расположение точек в шахматном порядке с перекрытием промежутков основного металла; контроль ширины зоны термического влияния (не более 0,2 диаметра точки).

Такая геометрия нанесения обеспечивает равномерное заглубление детали в почву и снижение скорости износа в активной зоне трения (рис.1).

Формирование системы опережающих трещин в уплотненном слое почвы за счет ударного взаимодействия с точками наплавки уменьшает связность абразивных частиц.

Сопоставление данных о физике эффекта Баушингера и параметров наплавки позволяет выявить скрытые резервы повышения долговечности. Процесс дуговой наплавки по своей природе является циклическим термомеханическим воздействием. Каждая наплавленная точка вызывает локальный нагрев и последующее охлаждение основного металла, что аналогично циклам термообработки, исследованным в контексте эффекта Баушингера.

В патентной документации [9, 10] указано на создание напряжений сжатия на рабочей грани. Согласно теориям эффекта Баушингера, остаточные макроскопические напряжения, образованные при пластической деформации, влияют на сопротивление обратному нагружению. Контролируемое формирование сжимающих напряжений в поверхностном слое может компенсировать растягивающие нагрузки, возникающие при эксплуатации, тем самым нивелируя негативное проявление эффекта разупрочнения.



Рисунок 1 – Нанесенные износостойкие покрытия (точки) на почворезущую поверхность дискатора (апробация в полевых условиях)

Ограничение ширины зоны термического влияния (ЗТВ) (до 0,2 диаметра точки) способствует быстрому отводу тепла и предотвращает нарушение исходной структуры закалки основного металла. Это коррелирует с данными о том, что низкотемпературные нагревы могут закреплять дислокации. Если параметры наплавки подобраны так, что температура в ЗТВ соответствует режиму отпуска (около 300°C), это может привести к устранению эффекта Баушингера в подповерхностном слое и повышению его прочностных характеристик за счет полигонизации.

Рабочий орган дискатора испытывает знакопеременные нагрузки при вращении и взаимодействии с неоднородной структурой почвы (рис. 1). Если материал покрытия или основы склонен к эффекту Баушингера, это может привести к преждевременному снижению предела текучести в зонах контакта. Использование материалов и режимов, снижающих чувствительность к смене знака нагрузки (например, за счет легирования или формирования определенной дислокационной структуры), повысит стабильность свойств в процессе эксплуатации.

Расположение точек в шахматном порядке обеспечивает перекрытие промежутков основного металла. Это создает условия для многократного деформирования контактного слоя почвы, что снижает ее прочность. Однако для самого металла детали это означает распределение термических циклов. Необходимо, чтобы последующие циклы наплавки не вызывали разупрочнения ранее упрочненных участков из-за эффекта Баушингера, возникающего при термическом расширении и сжатии соседних зон.

На основе проведенного анализа можно сформулировать ряд рекомендаций для совершенствования технологии упрочнения почворезущих органов:

При выборе режимов наплавки следует учитывать температуру подогрева и межслойного охлаждения как инструмент управления структурным состоянием. Целесообразно стремиться к режимам, обеспечивающим кратковременный отпуск в зоне термического влияния для снятия вредных остаточных напряжений без потери твердости [11].

Геометрия нанесения покрытия должна учитывать направление основных эксплуатационных нагрузок [12]. Поскольку эффект Баушингера зависит от направления приложения нагрузки относительно направления прокатки или деформации, ориентация линий армирования должна быть оптимизирована под вектор сил сопротивления почвы.

Проблема повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин не может быть решена исключительно путем увеличения твердости поверхности. Необходимо учитывать кинетику изменения механических свойств материала под воздействием циклических нагрузок и термических циклов. Эффект Баушингера является важным фактором, определяющим сопротивление материала повторному деформированию противоположного знака.

Интеграция знаний о природе данного эффекта в технологию нанесения износостойких покрытий позволяет обоснованно выбирать параметры наплавки (шаг точек, температуру, последовательность). Создание напряжений сжатия на рабочей грани, контроль ширины зоны термического влияния и использование промежуточной термической обработки способствуют устранению негативных проявлений знакопеременной деформации. В результате достигается не только повышение микротвердости по-

верхности, но и стабилизация прочностных характеристик всего объема детали, что в совокупности приводит к значительному увеличению срока службы рабочих органов почвообрабатывающих машин в условиях интенсивного абразивного износа.

Список использованной литературы

1. Калинин А.Б., Ружьев В.А., Дзібук И.С., Гринько С.В., Суслов А.С. Рациональные режимы функционирования дисковых рабочих органов // Сельский механизатор. – 2016. – №1. – С. 8-9.

2. Ружьев В.А., Калинин А.Б., Теплинский И.З. [и др.] Совершенствование рабочих органов машин и орудий для обработки почвы на основе реологической модели почвенного состояния // Аграрный научный журнал. – 2024. – № 11. – С. 163–174. – DOI 10.28983/asj.y2024i11pp163-174.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613752 Российская Федерация. Методы и средства повышения эффективности технологических процессов функционирования почвообрабатывающих рабочих органов машин и орудий: заявл. 14.02.2025; опублик. 14.02.2025 / В.А. Ружьев, А.Б. Калинин, И.З. Теплинский [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО СПбГАУ.

4. Результаты применения современных сварочных технологий упрочнения рабочих элементов корпуса лемешного плуга / Д.А. Капошко, В.А. Ружьев, Н.М. Ожегов, В.П. Чеботарев // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК, Минск, 06-07 июня 2019 г. – Минск: Белорусский государственный аграрный технический университет, 2019. – С. 66–70.

5. Ружьев В.А., Ловкис В.Б., Криштанов Е.А., Смирнова Ю.И., Дзібук И.С. Режимы работы комбинированного почвообрабатывающего агрегата с оптимизированными конструкционными параметрами рабочих органов // Вестник АПК Ставрополя. – 2018. – №3 (31). – С. 4–10.

6. Губарев В.Д., Ружьев В.А., Калинин А.Б. [и др.] Анализ технологического функционирования рабочих органов комбинированного почвообрабатывающего агрегата при внесении конструктивных изменений // Известия Международной академии аграрного образования. – 2021. – № 56. – С. 12–15.

7. Методы наплавки износостойких покрытий на поверхности деталей почвообрабатывающих машин / Д.А. Капошко, А.А. Воронин, В.В. Ковалев [и др.] // Проблемы энергообеспечения, автоматизации, информатизации и природопользования в АПК: Сборник материалов международной научно-технической конференции, Брянск, 20-21 декабря 2016 г. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2016. – С. 5-16.

8. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом экологических требований / В.А. Ружьев, Н.М. Ожегов, Д.А. Капошко // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 38. – С. 254–259.

9. Патент № 2697747 С2 Российская Федерация, МПК В23К 9/04, С23С 26/00, В23Р 6/00. Способ нанесения износостойких покрытий на рабочую поверхность почворезуших деталей почвообрабатывающих машин: № 2017125899: заявл. 18.07.2017; опублик. 19.08.2019 / Н.М. Ожегов, В.А. Ружьев, В.Д. Сулеев.

10. Патент на полезную модель № 172891 U1 Российская Федерация, МПК A01B 15/16, A01B 23/06, B23K 9/04. Почвообрабатывающий сферический диск: № 2016137210: заявл. 16.09.2016: опубл. 28.07.2017 / Н.М. Ожегов, В.А. Ружьев, О.С. Кузьмин, Н.П. Григорьев.

11. Современные методы упрочнения дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин / Н.М. Ожегов, В.А. Ружьев, В.Д. Губарев [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 2(76). – С. 95–98.

12. Патент на полезную модель № 230333 U1 Российская Федерация, МПК A01B 13/08, A01B 49/02. Агрегат для основной безотвальной обработки почвы с низким тяговым сопротивлением: № 2024121631: заявл. 30.07.2024: опубл. 28.11.2024 / В.А. Ружьев, А.Б. Калинин, И.З. Теплинский [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО СПбГАУ.

Summary. The problem of increasing the wear resistance of agricultural machinery components cannot be solved solely by increasing surface hardness. It is necessary to consider the kinetics of changes in the material's mechanical properties under cyclic loads and thermal cycles. The Bauschinger effect is an important factor determining a material's resistance to repeated deformation of the opposite sign.

УДК 631.3:681.9

Копчик Д.И., преподаватель-стажер

*Учреждение образования «Белорусский Государственный аграрный
технический университет», г. Минск, Республика Беларусь*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И РЕМОНТА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Аннотация. Рассматривается применение аддитивных технологий для восстановления и изготовления деталей сельскохозяйственной техники.

Abstract. The use of additive technologies for the repair and manufacturing of agricultural machinery parts is considered.

Ключевые слова. Аддитивные технологии, трехмерные (3D) изделия, 3D-принтер, 3D-печать.

Keywords. Additive technologies, three-dimensional (3D) products, 3D printer, 3D printing.

Аддитивные технологии (Additive Technologies) – это обобщенное название технологий изготовления трехмерных (3D) изделий по их компьютерным моделям путем последовательного добавления (наращивания) материала. Свое название (в буквальном переводе с английского – «добавляющие») они получили от английского слова «add» (добавлять) «вычитающим», или – в противоположность субтрактивным, традиционным технологиям (Subtractive Technologies), предусматривающим достижение требуемой формы изделия путем удаления («вычитания») материала с заготовки в результате ее механической, электроэрозионной и т.п. обра-