

Власовец В.М.
Заец В.Н.
Науменко А.А.
Гринченко А.С.
Алферов А. И.
Рыбалко М.С.
ХНТУСХ им. П. Василенка
Шаммедов М.О.
Туркменский
сельскохозяйственный университет
имени С.А. Ниязова

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРУЖИННЫХ
СТОЕК КУЛЬТИВАТОРА В УСЛОВИЯХ
ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

УДК 679.18:536.7-531.3.07

В работе проведено исследование причин низкой эксплуатационной стойкости пружинных стоек культиваторов отечественного производства и разработаны рекомендации по повышению их долговечности в условиях циклических нагрузок.

Ключевые слова: стойки культиваторов, долговечность, многоцикловая усталость, малоцикловая усталость, циклическая нагрузка

В условиях интеграции сельскохозяйственного производства Украины в общемировой рынок возрастают требования к качеству используемой сельскохозяйственной техники и повышению её долговечности [1]. В этой связи низкая долговечность стоек культиваторов отечественных производителей в сравнении с зарубежными приобретает особую актуальность для фермерских хозяйств и средних сельскохозяйственных предприятий, которые в отличие от крупных агрохолдингов не могут обеспечить закупки дорогостоящей импортной техники. Проблемой обеспечения надежности за счет повышения гамма-процентного ресурса стоек занимались Белецкий Д.М., Бойцов Б.В., Гоберман В.А. [2-3]. Вопросами оптимизации ресурса за счет изменения конструктивной прочности Грошев Л.Н, Касьянов В.Е., Коновалов Л.В. [4]. Однако данные исследования охватывали преимущественно стадию изготовления, но не эксплуатации. Показано [5-9], что для повышения долговечности деталей целесообразно использовать различные способы упрочнения, в том числе дробеструйной обработкой. Несмотря на то, что вопросам влияния карбидной фазы и включений на эксплуатационную стойкость деталей в условиях циклических нагрузок посвящен ряд работ [10-11], однако их влияние в областях мало- и многоциклового усталости, в которых работают стойки культиваторов, изучено недостаточно.

Целью работы является исследование причин низкой эксплуатационной стойкости пружинных стоек и разработка рекомендаций по повышению их долговечности в условиях циклических нагрузок.

Материалы и методы исследования. Металлографические методы контроля включали оценку макро- и микроструктуры, количества неметаллических включений по специально разработанной методике [12]. Исследования микроструктуры проводили на микрошлифах на металлографическом микроскопе МИМ-8М при увеличении $\times 100$ и $\times 1000$. Анализированные поверхности травили 4%-ным раствором азотной кислоты (HNO_3) в этиловом спирте (ГОСТ 5639).

Замеры твердости проводили на твердомере ТК-2М алмазным наконечником для наиболее нагруженного сечения стойки (рис. 1). На рис. 3 представлены фотографии фрагмента стойки, указаны её геометрические размеры и схема замера твердости по Роквеллу на поверхности и торцах вырезанного из наиболее нагруженного участка образца.

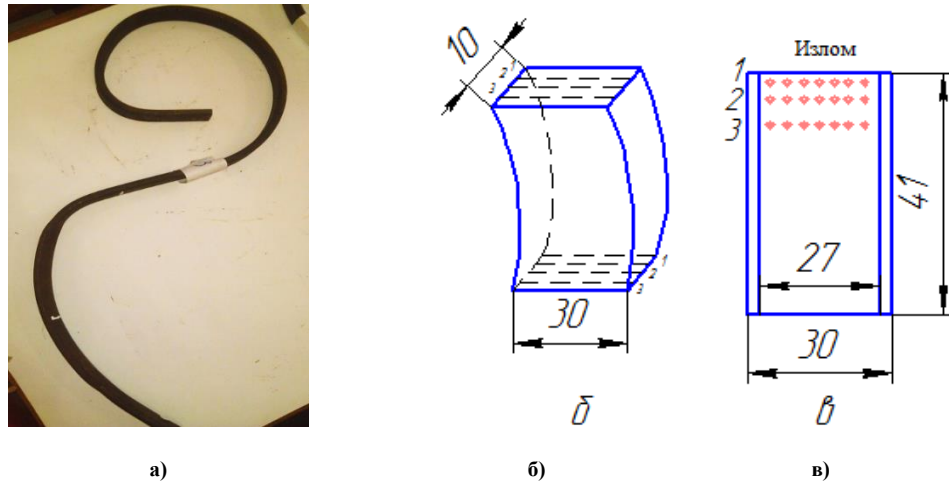


Рис. 1 – Определение твердости в наиболее нагруженном сечении стойки: а – фрагмент стойки; б – замер на торце; в – места замера на поверхности

Исследования изломов осуществляли на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе JSM-820 Link “JEOL” с системой рентгеновского микроанализа Link AN10/85S “Link Analytical” (рис. 2). При этом эффективный размер пятна составил 2–3 мкм.

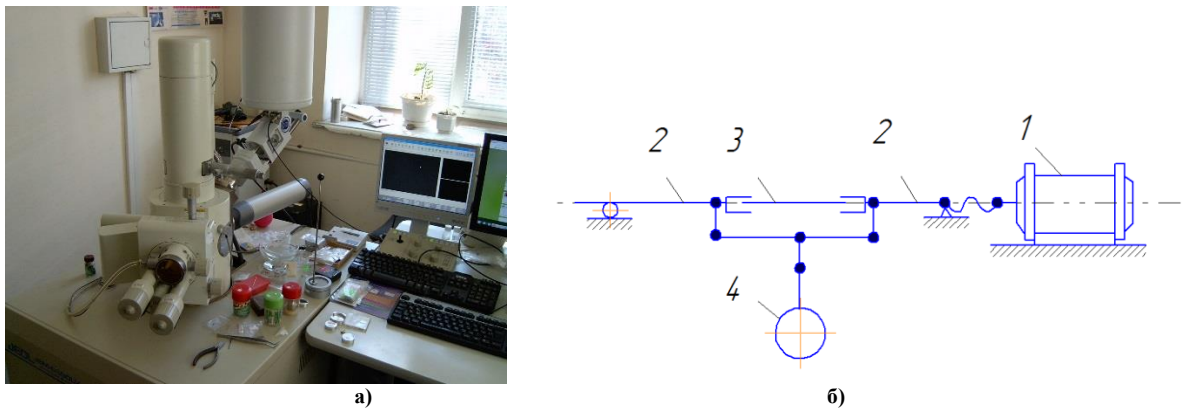


Рис.2. - Растровый электронный микроскоп-микроанализатор JSM-820 Link “JEOL” (а) для исследования поверхности изломов и схема машины для испытаний на усталость образцов по схеме кручение с изгибом (б): 1 – электродвигатель, 2 – шпиндели, 3 – образец, 4 – гири.

Для моделирования усталостной повреждаемости металла использовали машину типа НУ. Усталостные испытания проводили на гладких образцах второго типа (рис. 3). Рабочая часть образцов была изготовлена не ниже 3-го класса точности. Среднее арифметическое поверхности профиля рабочей части R_a составило 0,1– 0,2 мкм. Биение образца не превышало 0,001.

Для упрочнения поверхностного слоя образцы подвергали дробеструйной обработке механической смесью чугуновой дроби и кварцевого песка при давлении $0,5 \pm 0,05$ МПа и потере воздуха 2,5 м³/мин. Дистанцию обработки изменяли в пределах 130-150 мм. Угол наклона падения рабочей смеси к обрабатываемой поверхности изменяли от 55 до 70°.

Результаты исследований и их обсуждение. Выполнили измерения твердости в наиболее нагруженном сечении пружинной стойки культиватора по глубине (рис. 3). Согласно техническим условиям на изготовление стойки твердость не должна быть ниже 45 HRC. Однако по результатам замеров твердость существенно снижается до 25 HRC у внутренней и наружной поверхности стойки культиватора.

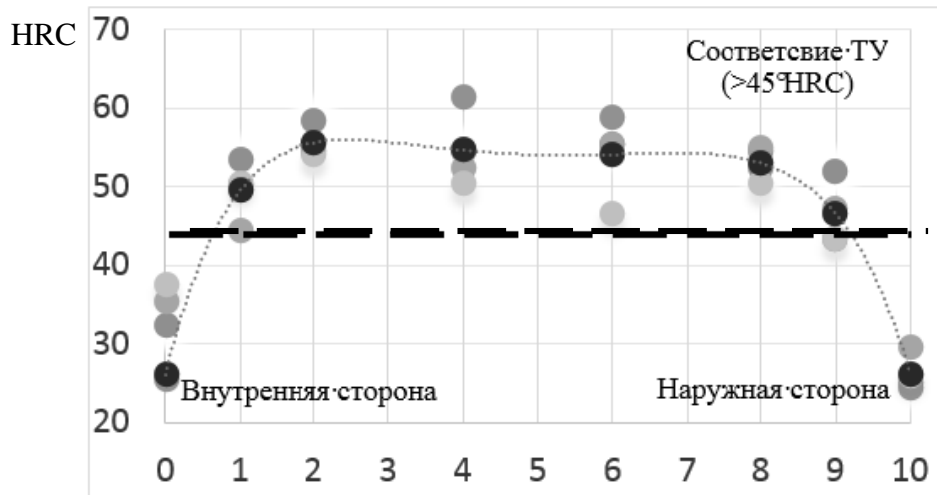


Рис 3. – Распределение твердости по глубине пружинной стойки в наиболее нагруженном сечении

Для определения причин снижения твердости вырезали образец из наиболее нагруженного сечения стойки и провели металлографические исследования (рис. 4). Установлено, что основная причина снижения твердости – наличие обезуглероженного слоя глубиной до 1 мм. Основу такого поверхностного слоя составляет феррит – пластичная фаза, которая снижает усталостную долговечность отечественных стоек.

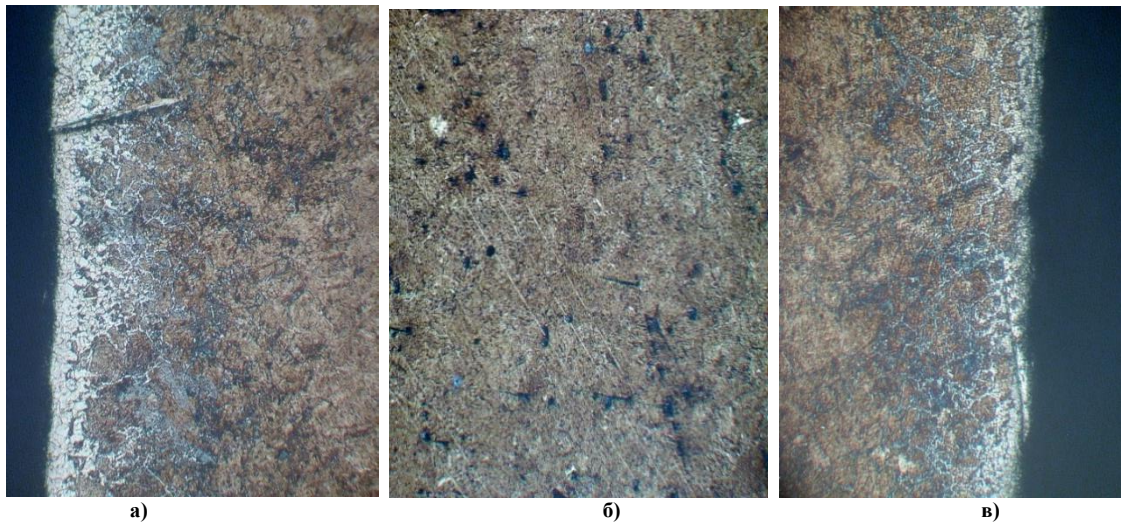


Рис. 4 – Микроструктура поперечного сечения пружинной стойки культиватора, $\times 100$: а - внешняя сторона, б - середина, в – внутренняя сторона

Одним из эффективных способов повышения усталостной долговечности деталей, является упрочнение рабочих поверхностей дробеструйной обработкой. Для оценки возможных путей повышения долговечности выполнили исследования на специально приготовленных образцах из стали с ферритной основой - в исходном состоянии (гладкая полированная поверхность) и после дробеструйной обработки. Выбор такого материала был обусловлен необходимостью определить влияние и возможные пути повышения усталостной долговечности (в мало- и многоциклового областях) стоек с обезуглероженным слоем.

На рис. 5 представлена полная кривая усталости в диапазоне напряжений от границы прочности до границы выносливости.

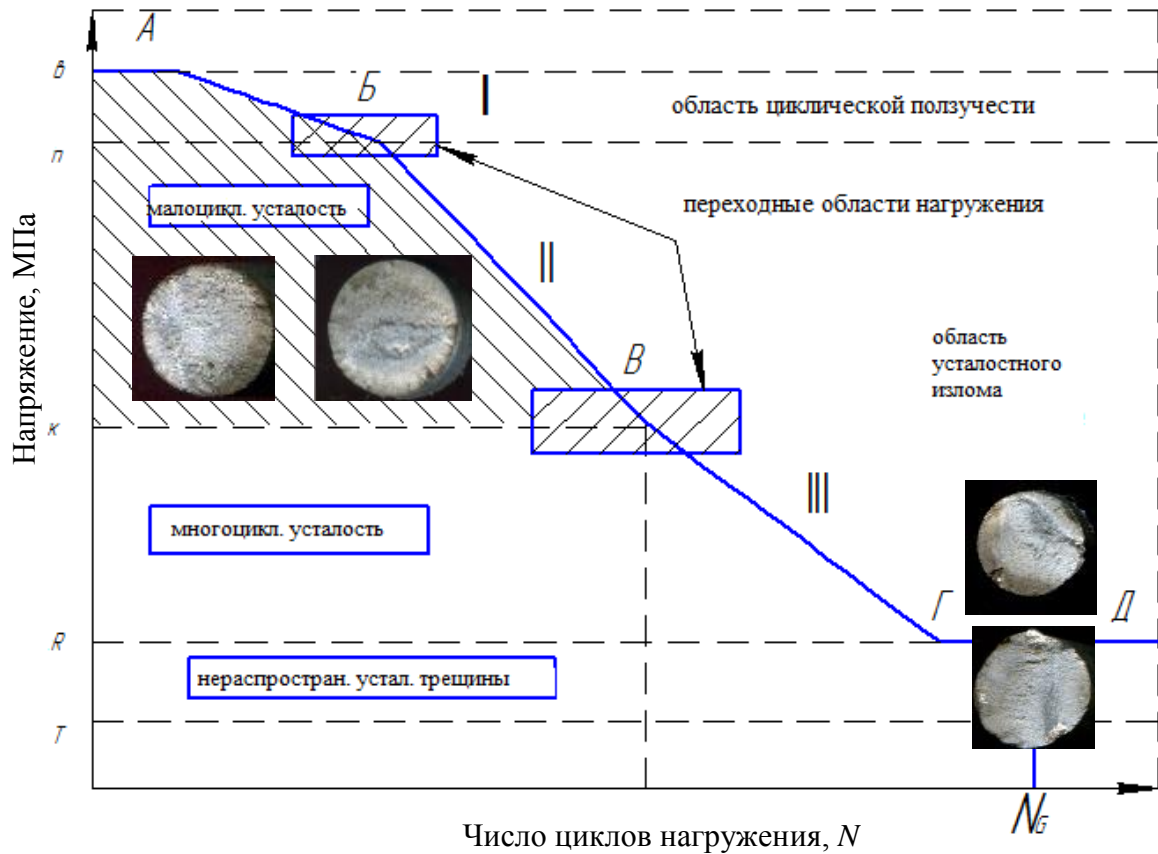


Рис. 5 – Полная кривая усталости и типичные поверхности разрушения исследованных образцов [13]

Полная кривая делится на две основные области – малоциклового и многоциклового усталости [13]. Малоцикловая усталость охватывает диапазон напряжений σ_b и σ_k (ломаная линия АБВ). В области малоциклового усталости можно выделить две характерные области: I, которую иногда называют областью циклической и II, где на поверхности разрушения можно выделить зону усталостного излома. Ниже пороговых циклических напряжений σ_k начинается область многоциклового усталости (рис. 5, кривая ВГД). Кроме напряжения границы выносливости σ_R , на полной диаграмме усталости выделено пороговое напряжение σ_T^H (циклическая граница текучести), которая лежит ниже границы выносливости. В интервале напряжений $\sigma_R - \sigma_T^H$ в пластических металлах наблюдается локальная пластическая деформация и даже не распространенные усталостные микротрещины глубиной порядка размера зерна.

Во всех случаях испытаний основным критерием отказов являлось полное разрушение образцов. Исследовали поверхность разрушения образцов.

Установлен смешанный механизм разрушения, который изменяется от хрупкого (рис. 6) на отдельных участках (при раскрытии трещин) до преимущественно вязкого. Микроразрывы зарождаются на поверхностях раздела между матрицей и частицами – такими, как дисперсные выделения, неметаллические включения, а также на несовершенствах типа микротрещин. В условиях трехосного напряженного состояния впереди трещины эти микроразрывы растут и расширяются вплоть до момента слияния, оставляя позади себя на поверхности разрушения полусферические полости – ямки. Форма и глубина ямок обусловлена размером, межчастичным расстоянием ответственных за их зарождение частиц, вязкостью разрушения металла.

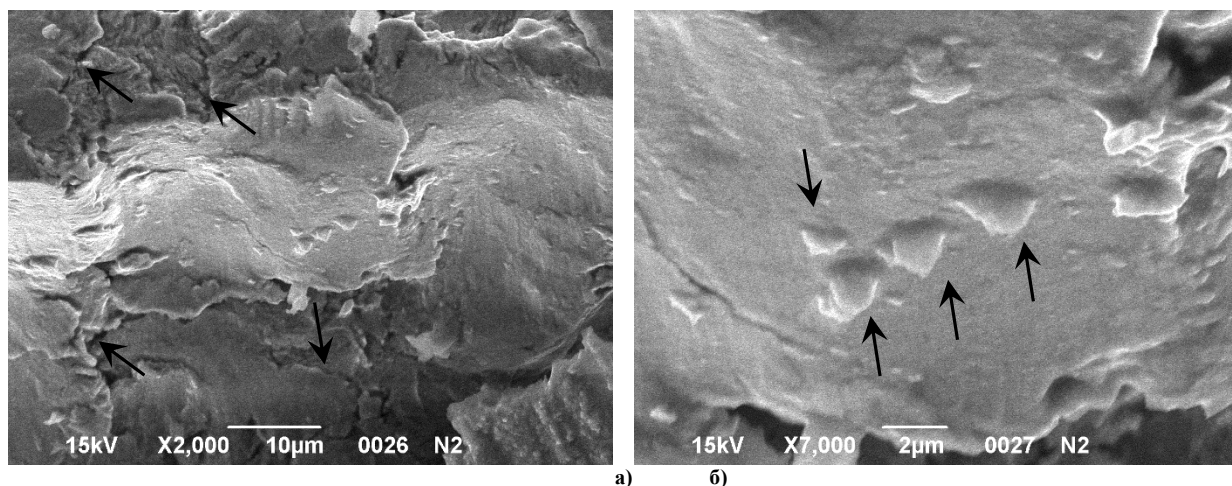


Рис. 6 - Рельеф разрушения сколом вдоль магистральной трещины образца из низколегированной стали при многоциклового усталости: а – плоскости скола имеют направленность, обусловленную ориентировками различных зерен (стрелками указаны локальные межзеренные микротрещины); б – язычки (тонкие отщепления) на участке скола

Перлитные колонии, которые представляют собой чередующиеся пластины цементита Me_3C и феррита склонны к легкому разрушению под действием большой пластической деформации в вершине трещины. Зарождение такой ямки (зона А на рис. 7 а) является результатом разрушения небольшой колонии перлита.

Очаг зарождения микропоры (зона Б см.рис. 7 а и 7 б), характерен для ямок, образовавшихся на выделениях сферической и вытянутой формы (сульфиды марганца, сложные силикаты). Вблизи этих ямок видны волнистые тонкие линии скольжения (зона С см.рис. 7 б), которые свидетельствуют о их росте путем скольжения по многим действующим системам.

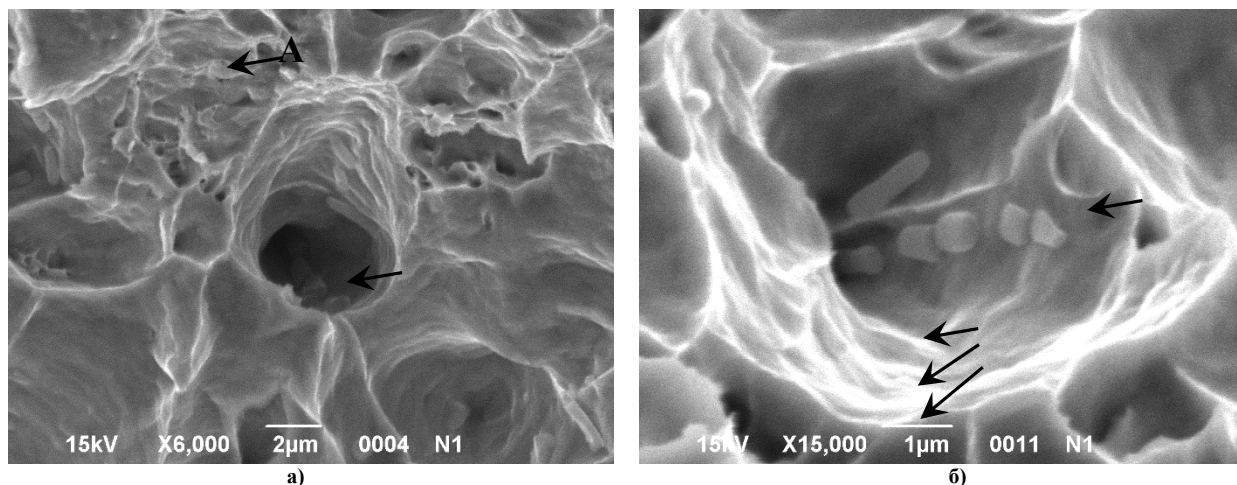


Рис.7 - Два различных типа мест зарождения ямок, образовавшихся путем слияния микропор при увеличении (а) $\times 6000$ и (б) $\times 15000$: А – ямка, образовавшаяся путем разрушения небольшой колонии перлита; Б - ямки зародились на границе раздела между матрицей и включениями (включения – сульфиды, вытянутые вдоль направления прокатки); С – волнистые тонкие линии скольжения.

Выполнили исследование характеристик поверхности усталостных изломов с помощью растровой электронной микроскопии, которые позволили идентифицировать стадии разрушения исследованного материала.

Первая стадия – развития усталостной трещины характерна для неупрочненной поверхности образца в области многоциклового усталости. Эта стадия характеризуется зарождением трещин и их распространением путем разрушения по плоскостям скольжения при продвижении внутрь от поверхности (зона А на рис. 8 а и б). В каждом зерне поверхность разрушения соответствует определенной кристаллографической плоскости. Отмечено

также наличие механизма зарождения трещин, связанного с образованием экструзий и интрузий (выступы и впадины на поверхности в верхней части фрактограммы на рис. 8 б) за счет локализованного скольжения в условиях знакопеременного нагружения.

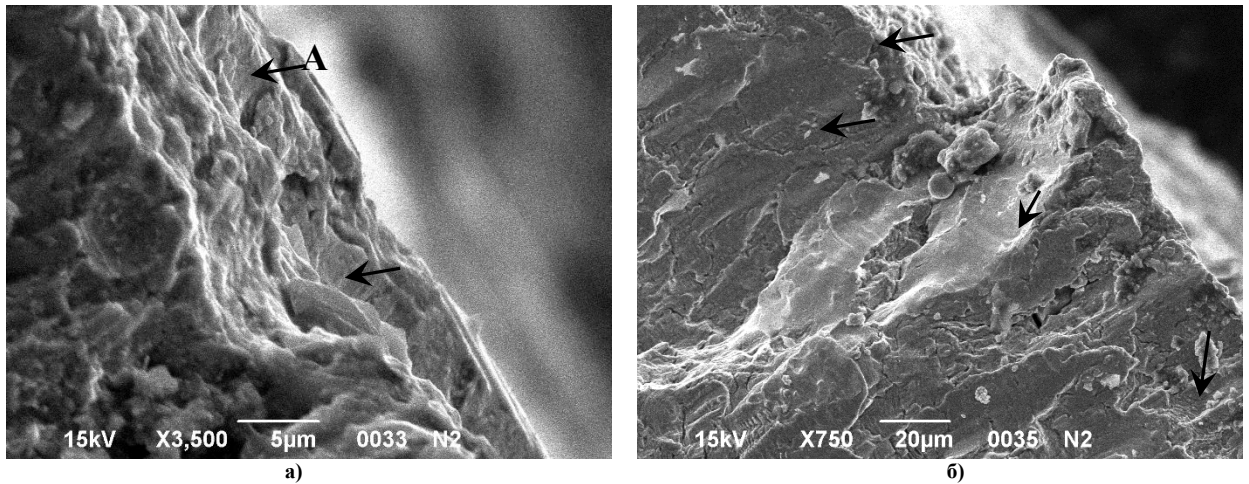


Рис. 8 - Стадии I и II развития усталостного разрушения гладкого образца в области многоциклового усталости, с очагом разрушения (зона А) вблизи верха фрактограммы на поверхности образца с переходом во вторую стадию (зона Б): а – стадия I; б – стадия I и II. Интенсивное трение поверхностей разрушения привело к возникновению бесструктурной волнистой поверхности (зона С).

Для стадии II усталостного разрушения (зона Б см.рис.8 б) характерно изменение ориентации главной плоскости разрушения в каждом зерне от одной или двух плоскостей сдвига ко многим параллельным террасам, разделенными продольными гребнями (рис. 9). Эти террасы перпендикулярны направлению максимального растягивающего напряжения.

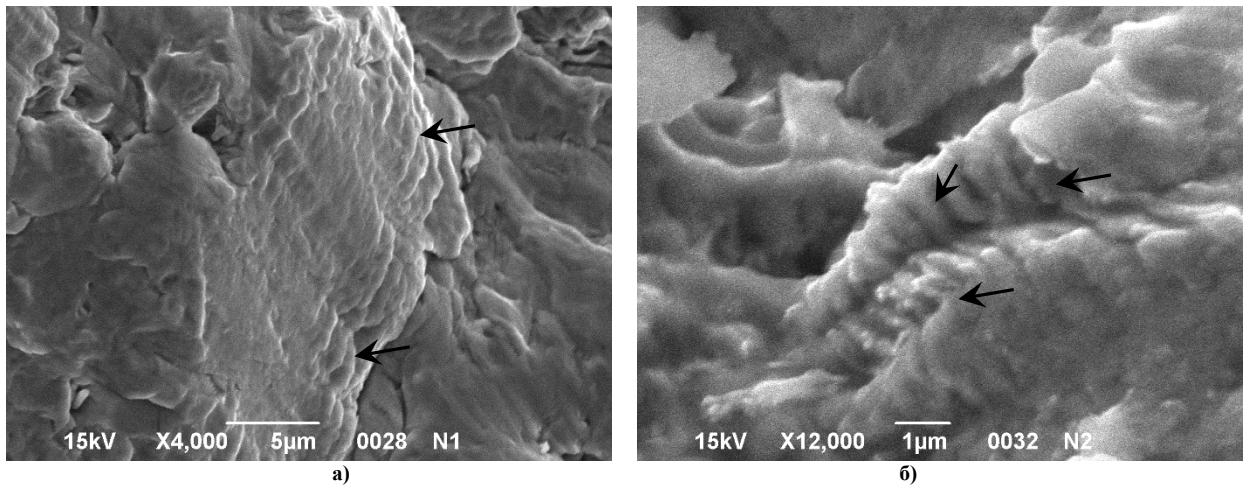


Рис.9. - Вязкие бороздки в усталостном изломе металла в малоцикловой (а) и многоцикловой (б) области разрушения

При высоких скоростях роста трещины или изменении свойств металла вследствие ликвации компонентов в пределах нескольких зерен, бороздки приобретают волнистый характер с грубым фронтом, при этом наблюдается множество вторичных трещин (рис. 10). В таком случае вблизи фронта трещины образуется значительная по протяженности пластическая зона, которая обуславливает значительное вторичное растрескивание (рис. 11). Каждая вторичная трещина распространяется как усталостная, создавая в результате сетку вторичных усталостных бороздок.

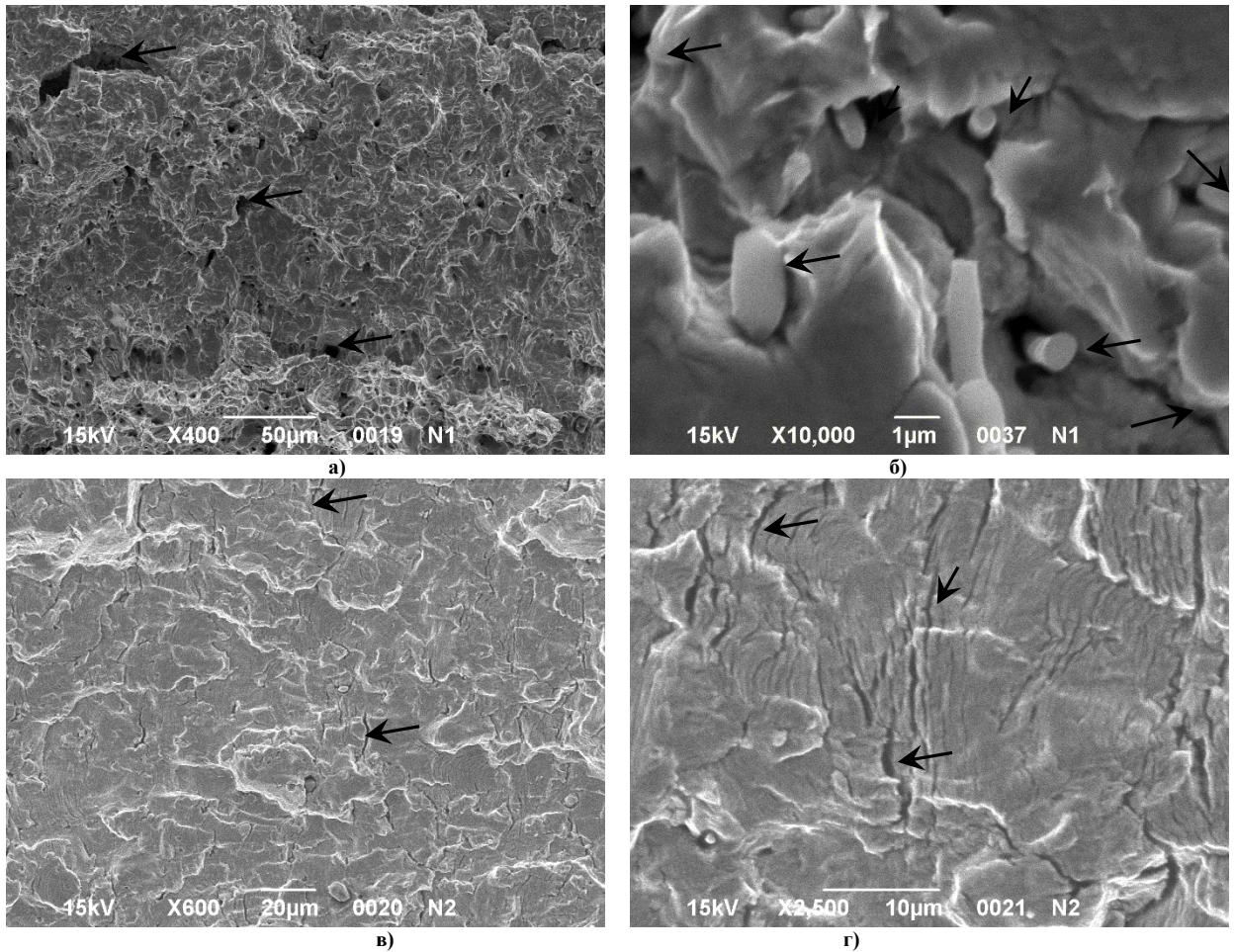


Рис. 10 - Рельеф поверхностей излома для малоцикловой (а, б) и многоцикловой (в, г) областей: стрелками обозначены микротрещины - равномерно распределенные по всему сечению излома образца образовавшиеся при непосредственном участии неметаллических включений (зона Б). Для многоцикловой области характерно расположенные микротрещины преимущественно в приповерхностном слое образца (в, г)

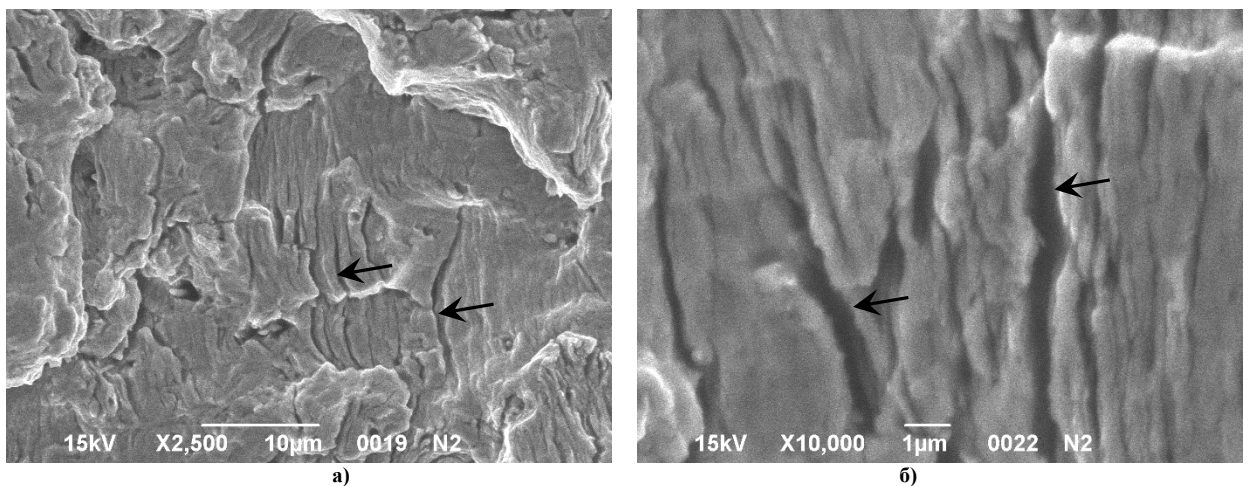


Рис. 11. - Вязкие бороздки с микротрещинами в усталостном изломе (многоцикловая зона), обусловленные высоким значением коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины при увеличениях: а - $\times 2500$; б - $\times 10000$

Проведение дробеструйной обработки для упрочнения поверхностного слоя для малоцикловой области усталости позволяет уменьшить количество микротрещин в поверхностном слое на глубину до 0,75 мм (рис. 12 а, б). Несмотря на наличие упрочненного слоя наличие неметаллических включений оказывает неблагоприятное влияние (см.рис. 12 б) на развитие микротрещин под действием высоких напряжений. Для неупрочненной зоны характерно зарождение микротрещин по неметаллическим включениям, как и для гладкого

образца (см.рис.12 г). Для многоциклового области нагружения (рис. 13) характерно минимальное количество усталостных микротрещин вплоть до разрушения образца.

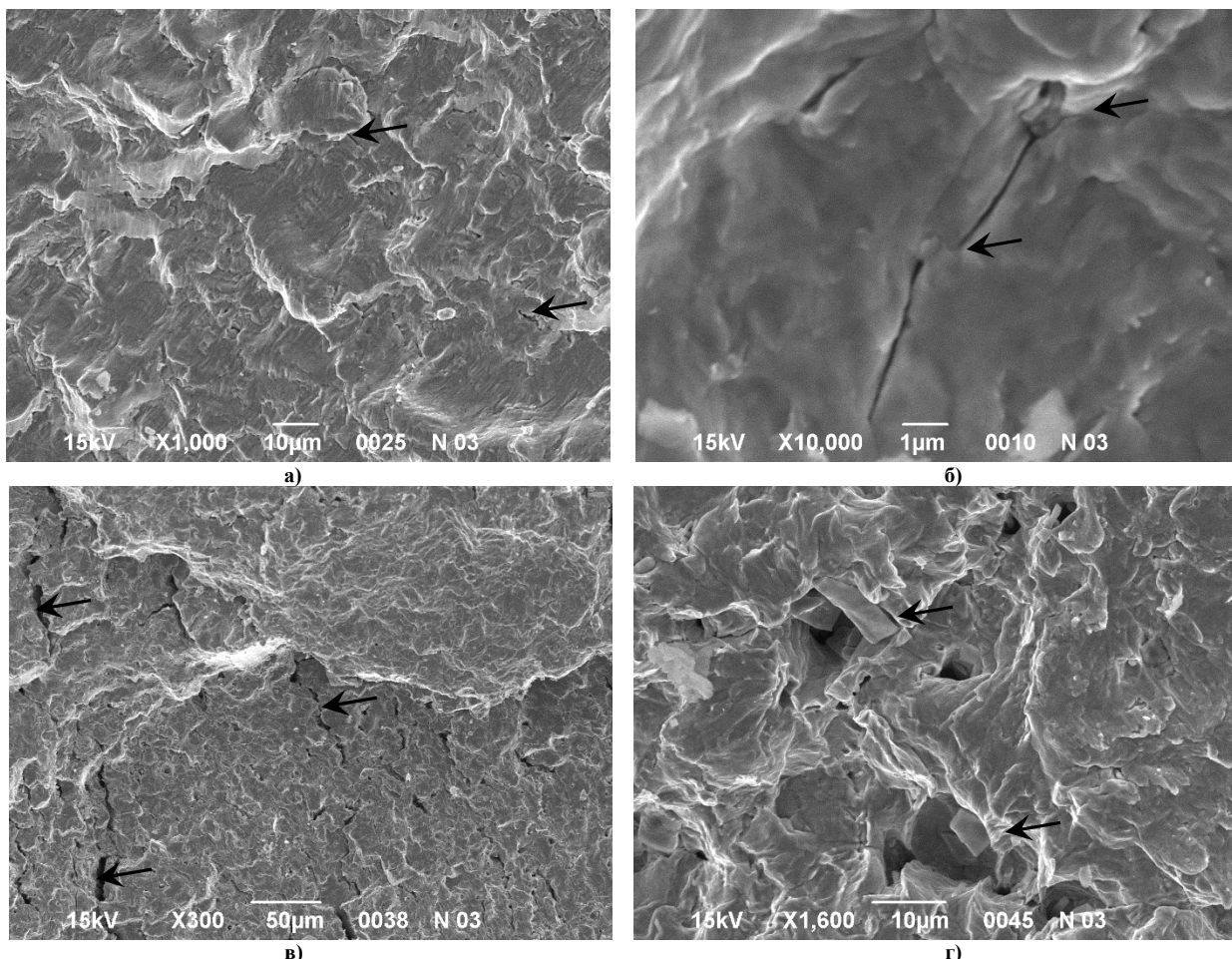


Рис. 12. - Усталостный излом в малоциклового области после дробеструйного наклепа поверхностного слоя (а, б) и вне зоны упрочнения (в, г). Стрелками указаны неметаллические включения

Установлено, что дробеструйная обработка повышает усталостную долговечность, как для малоциклового, так и многоциклового областей (рис. 14). Для области малоциклового усталости после дробеструйной обработки поверхности характерно разрушение образцов от микротрещин усталости, которые развиваются преимущественно от структурных концентраторов напряжений - неметаллических включений, пор, оксидов металла и шлаковых включений. Поэтому для стоек культиваторов, которые будут работать в условиях повышенной нагрузки на тяжелых почвах будет наибольшее влияние иметь качество металла по всему сечению стойки. Для таких условий эксплуатации необходимо выбирать сталь с повышенной устойчивостью к усталостному разрушению.

Для условий многоциклового усталости преобладающее влияние имеет состояние приповерхностного слоя и упрочненной поверхности детали.

Дробеструйная обработка поверхности способствует значительному повышению долговечности деталей, как в малоциклового – так и многоциклового областях.

Результаты испытаний на усталостную прочность представлены на рис. 14.

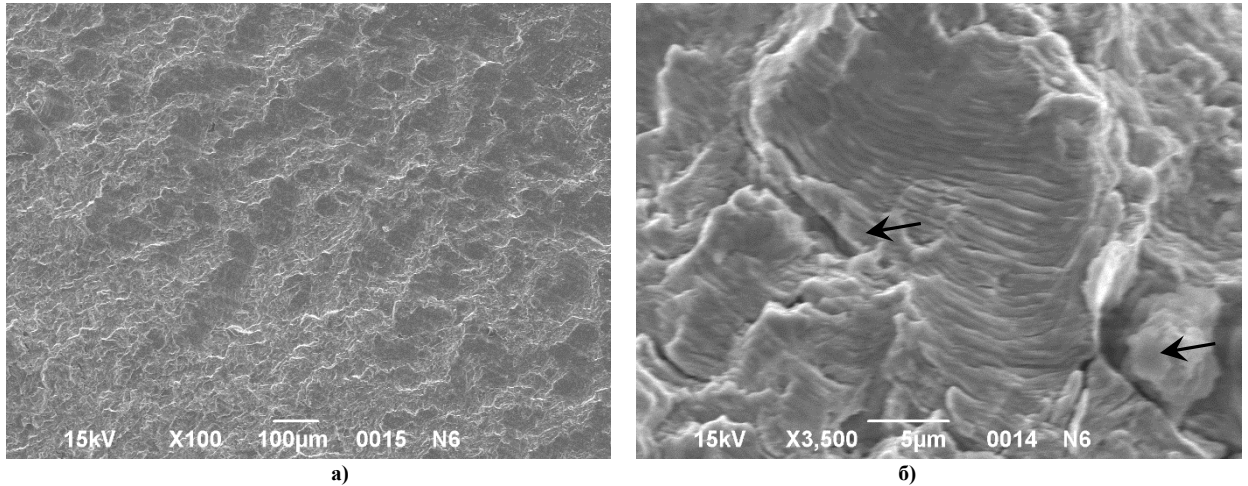


Рис. 13 Усталостний излом в многоциклової області після дробеструйного наклепа поверхнього шару (а, б). Стрелками показані мікротріщини, які виявляються тільки при великому збільшенні

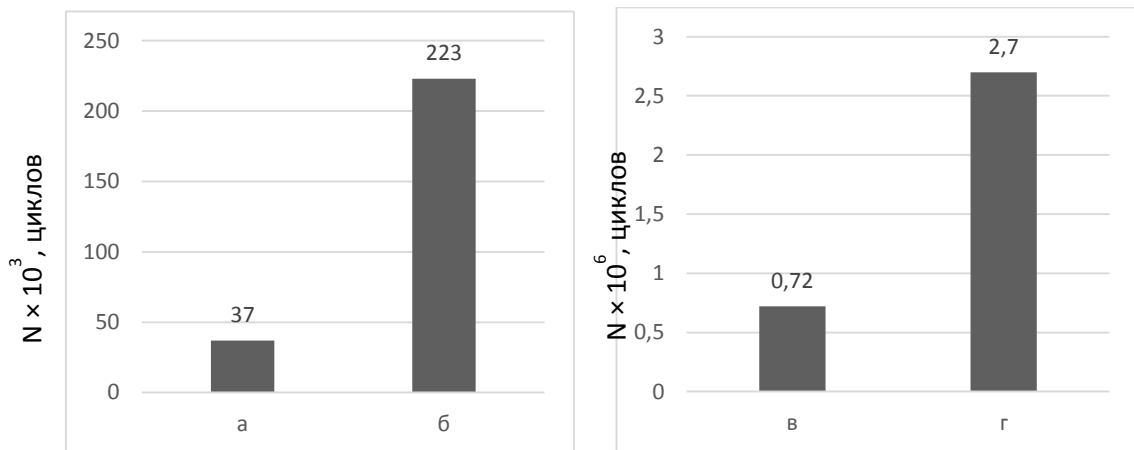


Рис. 14. Кількість циклів до руйнування зразків: а, в – в початковому стані; б, г – після дробеструйної обробки; зразки а,б руйнувалися в межах малоциклової зони втоми; зразки в,г руйнувалися в межах многоциклової втоми.

Висновки

Установлено, що основною причиною вихода з ладу пружинних стоек культиваторів є втомильне руйнування. Для стоек вітчизняного виробництва характерно наявність обезуглероженого шару на поверхнях. Установлено, що дробеструйна обробка підвищує втомильну довговічність, як для малоциклової, так і многоциклової області. Для області малоциклової втоми після дробеструйної обробки поверхні характерно руйнування зразків від мікротріщин втоми, які розвиваються переважно від структурних концентраторів напружень - неметалічних включень, пор, оксидів металу і шлакових включень. Для умов многоциклової втоми переважаюче впливає стан приповерхні шару і упрочненої поверхні деталі.

Автори виражають слова вдячності Скобло Т.С. за цінні консультації, Кухтову В.Г. за надані можливості проведення експерименту, Каденко В.С. за надання пружинних стоек різних виробників, Папуге І.А. за допомогу в проведенні втомильних випробувань.

Литература

1. Федоров С. Е., Чаткин М. Н. Исследование динамики пружинной стойки методом «эквивалентного бруса» // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск, 2013. – С. 66-68.
2. Багманов, Р. С. Улучшение качества предпосевной обработки почвы и снижение энергозатрат путем обоснования параметров культиватора с упругими рабочими органами : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.20.01 / Багманов Рубин Сабирович. – Москва, 2012. – 18 с.
3. Агафонов Н.І. Ефективне використання сільськогосподарської техніки. – М.: Знання, 1997 –№ 4. – 63 с.
4. Гринченко А.С. Механическая надежность мобильных машин: Оценка, моделирование, контроль / Віровець АП" Апостроф, 2012 – 259с.
5. Skoblo T.S., Vlasovets V.M., Moroz V.V. Structure and distribution of components in the working layer upon reconditioning of parts by electric-arc metallization / Metal science and heat treatment, Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers T.43, 497-500
6. Туренко А.Н., Полянский А.С., Лузан С.А. Интегрирование технологи газотермического напыления покрытий и метода электроискрового легирования // Автомобильный транспорт : сб. научн. трудов. – 2011. – Вып. 28. – С. 109-113.
7. Skoblo T.S., Vlasovets V.M. The structure and distribution of the components in the working layer upon parts arc spraying metallizing reconditioning / TS Skoblo, VM Vlasovets // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov 2001. - 12, 26-29
- 8.. Скобло Т.С., Коломиец В.В., Власовец В.М., Ридный В.Ф., Ридный Р.В.. Оценка износостойкости покрытий среднеуглеродистых сталей, улучшенных микролегированием и деформационным упрочнением: сборник // Вісник СевНТУ. - Севастополь : СевНТУ, 2011. - Вип. 120: Механіка, енергетика, екологія. - С. 83-86
9. Skoblo T.S., Vlasovets V. M. Specific features of the formation of structures in 60KH2N4GMF precipitation-hardening steel // Materials Science. Vol. 47. No. 5. March. 2012 P. 644-650
10. Власовец В.М. Влияние температуры отжига на состав и количество карбидной фазы в доэвтектоидной стали типа 60X2H4ГМФ // Металознавство та термічна обробка металів. – Дніпропетровськ, 2010. – Вип. 2. - С.76-82.
11. Скобло Т.С., Науменко А.О., В.М. Власовець В.М., Белкін Є.Л. Розробка математичної моделі деформаційних навантажень при віброобробці робочих органів сільськогосподарської техніки / ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ XVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ " Сучасні проблеми землеробської механіки". – 2015 р., стор 134 – 145.
12. Власовец В.М., Ефременко В.Г., Заец В.Н. Разработка методики автоматизированного подсчета количества неметаллических включений в стали при оценке качества изделий // Вісник ХНТУСГ “Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва”. – Харків, 2014. – вип. 151. – с.266–274.
13. Терентьев В.Ф. Стадийность процесса усталостного разрушения металлических материалов // Металлы. –1996. – № 6. – С. 14-20.
14. Власовец В.М, Заец В.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния вокруг включений карбидов при охлаждении эвтектоидной стали в условиях нестационарной теплопроводности. Вестник ХНТУСХ. Вып № 163 2015г - С158-166.

Vlasovets V.M., Zaiets V. N., Naumenko A.A., Grinchenko A. S., Alferov A. I., Rubalko M.S., Shammedov M.O. **Increase of durability of the cultivator tines under cyclic loads during maintenance**

This article presents the causes of low operational stability tines cultivators domestic production and development of recommendations to improve their durability under cyclic loads.

Key words: cultivators rack, durability, cycle fatigue, low cycle fatigue, cyclic loading

References

1. Fedorov C. E., Chatkin M. N. Issledovanie dinamiki pruzhinnoy stoyki metodom «ekvivalentnogo brusa» / // Energoeffektivnyie i resursosberegayuschie tehnologii i sistemyi: mezhvuz. sb. nauch. tr. – Saransk, 2013. – S. 66-68.
2. Bagmanov, R. S. Uluchshenie kachestva predposevnoy obrabotki pochvyi i snizhenie energozatrat putem obosnovaniya parametrov kultiatora s uprugimi rabochimi organami: avtoref. dis. kand. tehn. nauk : 05.20.01 / Bagmanov Rubin Sabirovich. – Moskva, 2012. – 18 s.
3. Agafonov N.I. Efektivne vikoristannya silskogospodarskoYi tehniki. – M.: Znannya, 1997 –# 4. – 63 s.
4. Grinchenko A.S. Mehanicheskaya nadezhnost mobilnyih mashin: Otsenka, modelirovanie, kontrol / VIrovets AP" Apostrof, 2012 – 259s.
5. Skoblo T.S., Vlasovets V.M., Moroz V.V. Structure and distribution of components in the working layer upon reconditioning of parts by electric-arc metallization / Metal science and heat treatment, Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers T.43, 497-500
6. Turenko A.N., Polyanskiy A.S., Luzan S.A. Integrirovaniye tehnologi gazotermicheskogo napyileniya pokrytiy i metoda elektroiskrovogo legirovaniya / // Avtomobilnyiy transport: sb. nauchn. trudov. – 2011. – Vyip. 28. – S. 109-113.
7. Skoblo T.S., Vlasovets V.M. The structure and distribution of the components in the working layer upon parts arc spraying metallizing reconditioning / TS Skoblo, VM Vlasovets // Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov 2001. - 12, 26-29
8. Skoblo T.S., Kolomiets V.V., Vlasovets V.M., Ridnyiy V.F., Ridnyiy R.V.. Otsenka iznosostoykosti pokrytiy sredneuglerodistyih staley, uluchshennyih mikrolegirovaniem i deformatsionnyim uprochneniem: sbornik // VIsnik SevNTU. - Sevastopol: SevNTU, 2011. - Vip. 120: Mehanika, energetika, ekologiya. - S. 83-86
9. Skoblo T.S., Vlasovets V. M. Specific features of the formation of structures in 60KH2N4GMF precipitation-hardening steel / // Materials Science. Vol. 47. No. 5. March. 2012 R. 644-650
10. Vlasovets V.M. Vliyanie temperatury otzhiga na sostav i kolichestvo karbidnoy fazyi v doevtektoidnoy stali tipa 60H2N4GMF // Metaloznavstvo ta termichna obrobka metalliv. – DnIpropetrovsk, 2010. – Vip. 2. - S.76-82.
11. Skoblo T.S., Naumenko A.O., V.M. Vlasovets V.M., BELIn E.L. Rozrobka matematichnoYi modeli deformatsiynih navantazhen pri vIbroobrobtsI robochih organiv silskogospodarskoYi tehniki / ZBIRNIK TEZ DOPOVIDEY XVI MIZhNARODNOYi NAUKOVOYi KONFERENTsIYi " Suchasni problemi zemlerobskoYi mehaniki". – 2015 r., stor 134 – 145.
12. Vlasovets V.M., Efremenko V.G., Zaets V.N. Razrabotka metodiki avtomatizirovanogo podscheta kolichestva nemetallicheskih vklyucheniyy v stali pri otsenke kachestva izdeliy // VIsnik HNTUSG “Problemi nadlynosti mashin ta zasobiv mehanizatsIYi silskogospodarskogo virobnitstva”. – Harkiv, 2014. – vip. 151. – s.266–274.
13. Terentev V.F. Stadiynost protsessa ustalostnogo razrusheniya metallicheskih materialov // Metallyi. –1996. – # 6. – S. 14-20.

14. Vlasovets V.M, Zaets V.N. Modelirovanie napryazhYonno-deformirovannogo sostoyaniya vokrug vklyucheniya karbidov pri ohlazhdenii evtektoidnoy stali v usloviyah nestatsionarnoy teploprovodnosti. Vestnik HNTUSH. Vyip # 163 2015g - S158-166.