

Власовец В.М.,  
Заец В.Н.,  
Серебренников М. А.,  
Решетняк В.Н.  
ХНТУСХ ім. П. Василенка  
E-mail: zaietsvaleria@mail.ru

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ПРИ  
УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ НА  
МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ИЗ  
МАЛОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

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, малоцикловая усталость, циклическая нагрузка

Необходимость повышения производительности современных сельскохозяйственных машин требует разработки новых и повышения долговечности традиционных рабочих органов землеобрабатывающей техники.

Широкое применение получили сельскохозяйственные машины для обработки почвы с рабочими органами на пружинной подвеске – S – образные стойки культиваторов [1-3]. Низкая долговечность стоек культиваторов отечественных производителей приобретает особую актуальность для сельскохозяйственных предприятий. В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на повышение долговечности изделий. Вопросами оптимизации ресурса за счет изменения конструктивной прочности Лозинский М.Г., Романов А.Н., Грошев Л.Н, Касьянов В.Е., Коновалов Л.В. [4]. Проблемой обеспечения надежности и долговечности за счет повышения ресурса стоек занимались Бурченко П.Н., Афанасьев Н.Н., Белецкий Д.М., Бойцов Б.В., [6-7]. Однако данные исследования охватывали преимущественно стадию изготовления, но не эксплуатации. Показано [8], что для повышения долговечности деталей целесообразно использовать различные способы упрочнения, в том числе дробеструйной обработкой. Однако для области малоциклового усталости ряд вопросов мало освещен [9], в частности использование неразрушающего магнитного контроля по коэрцитивной силе.

**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.**

Для моделирования усталостной повреждаемости металла использовали машину типа НУ. Усталостные испытания проводили на гладких образцах второго типа различной обработки в воздушной среде при комнатной температуре (рис. 1). Частота нагружения составляла 50 Гц. 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.

Испытания проводили на 3 партиях образцов. Первая партия образцов была исходной – гладкие образцы второго типа, и использовалась для испытаний на малоцикловую усталость. Вторая партия была подвергнута предварительной дробеструйной обработке. Для упрочнения поверхностного слоя образцы обрабатывались механической смесью чугунной дроби и кварцевого песка при давлении  $0,5 \pm 0,05$  МПа и потере воздуха  $2,5$  м<sup>3</sup>/мин. Дистанцию обработки изменяли в пределах 130-150 мм. Угол наклона падения рабочей смеси к обрабатываемой поверхности изменяли от 55 до 70°. Третья партия образцов была предварительно деформирована выше предела текучести, а затем обработана по режимам первой и второй партий.

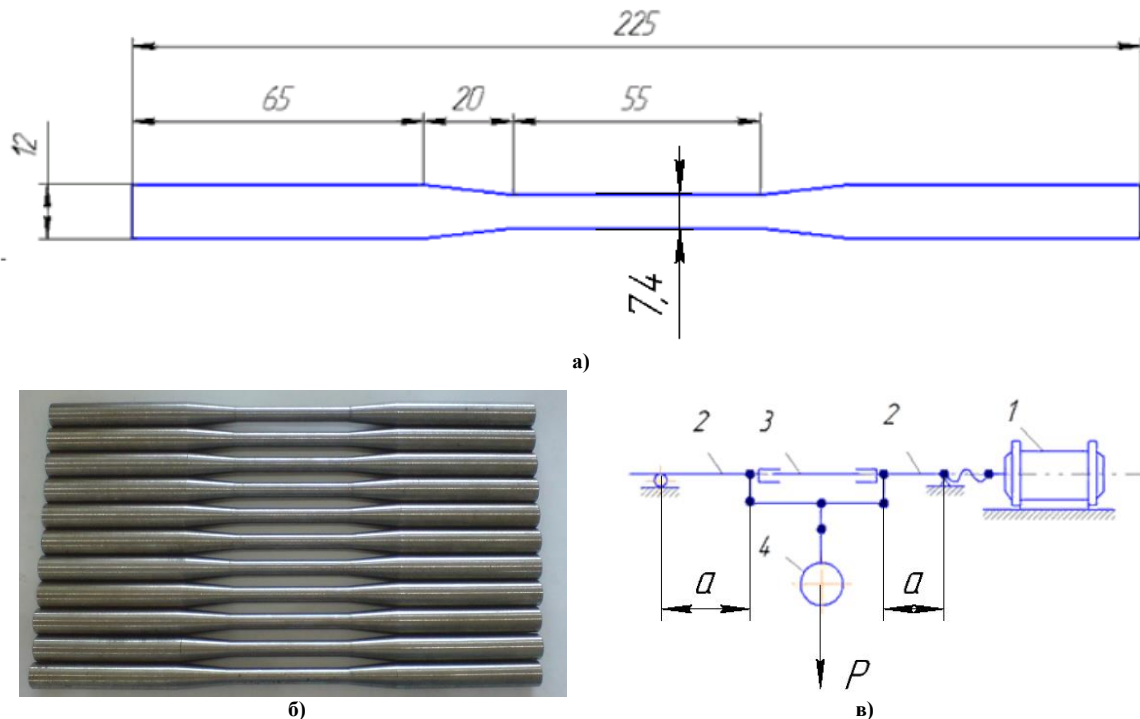


Рис 1. Эскиз образца (размеры в мм) - а), б) – фото нескольких образцов для усталостных испытаний, в) – схема машины для усталостных испытаний типа НУ, 1 – электродвигатель, 2 – шпиндели, 3 – образец, 4 – нагрузка.

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 ( $\text{HNO}_3$ ) в этиловом спирте (ГОСТ 5639).

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.

На всех исследуемых образцах осуществляли контроль коэрцитивной силы прибором КРМ-Ц.

### Результаты исследований и их обсуждение.

Предварительное нагружение образцов перед проведением усталостных испытаний рекомендуется рядом исследователей для повышения усталостной долговечности изделий. Значения  $N_c$  для образцов из третьей партии предварительно деформированных выше  $\sigma_{0,2}$  в исходном состоянии, а также после нагружения до 75 МПа и 105 МПа в сечении представлены в таблицах 1 и 2.

Предварительное нагружение образцов в упругой области способствует формированию напряжений в сечении образца. Как известно, коэрцитивная сила достаточно чувствительна к изменению их уровня и зачастую используется как магнитный параметр, позволяющий дать достаточно точную оценку не разрушая образца. Для таких оценок зачастую используется уравнение вида  $b = b_0 + b_1 \times N_c$ , в котором результирующий параметр  $b$  в уравнении соответствует показателю оцениваемой статистической характеристики;  $b_0$  – её базовый уровень (имеет размерность характеристики и физический смысл для в области граничных условий), а  $b_1$  – тангенс угла наклона прямой, характеризующий интенсивность изменения характеристики.

Таблица 1

Параметры испытаний и значения коэрцитивной силы для образцов предварительно деформированных выше  $\sigma_{0,2}$ .

Наименование режима измерений	Уровень $H_c$ по выборке <sup>1</sup> , А/см	
	mid	$\sigma$
Гладкие образцы второго типа		
В исходном состоянии	4,9	0,006
После нагружения до 75 МПа	5,0	0,009
Гладкие образцы второго типа после $0,3 \times 10^5$ циклов		
До нагружения после $0,3 \times 10^5$ циклов	5,1	0,007
После нагружения до 75 МПа после $0,3 \times 10^5$ циклов	5,1	0,004
Гладкие образцы второго типа после дробеструйного упрочнения		
В исходном состоянии	4,5	0,008
После нагружения до 105 МПа	4,4	0,014

Примечание. Серия испытаний предусматривала не менее 25 замеров на одном уровне, где mid - средние значения,  $\sigma$  – стандартное отклонение по выборке.

Установлено, что в результате поверхностного упрочнения образцов подвергнутых предварительному нагружению выше предела текучести дробеструйной обработкой происходит снижение уровня коэрцитивной силы на 8-10% (см.табл. 2). Такое снижение может быть объяснено тем, что исходные гладкие предварительно деформированные образцы имеют остаточные напряжения, которые уравниваются сжимающими напряжениями после поверхностного упрочнения.

Таблица 2

Изменения значений  $H_c$  для первой серии измерений (предварительно деформированные выше  $\sigma_{0,2}$  в исходном состоянии и после нагружения)

Наименование режима измерений	Коэффициенты линейного уравнения вида $b = b_0 + b_1 \times H_c$			
	mid		$\sigma$	
	$b_0$	$b_1$	$b_0$	$b_1$
Гладкие образцы второго типа				
После нагружения до 75 МПа	4,8	0,050	0,003	0,003
Гладкие образцы второго типа после $0,3 \times 10^5$ циклов				
После нагружения до 75 МПа спустя $0,3 \times 10^5$ циклов	5,1	0,000	0,010	-0,003
Гладкие образцы второго типа после дробеструйного упрочнения				
После нагружения до 105 МПа	4,6	-0,100	0,002	+0,006

Тангенс угла наклона (показатель  $b_1$  в линейном уравнении) после усталостных испытаний гладких образцов уменьшился до минимального значения, что свидетельствует о практически исчерпании ресурса пластичности для материала и существенном снижении интенсивности процессов. В то же время базовый уровень (показатель  $b_0$ ) магнитного параметра увеличился незначительно – на 5-6%.

Приложение нагрузки к исходному гладкому образцу увеличивает разброс значений  $H_c$ , что вызвано, по всей видимости, перераспределением первичных напряжений после деформации. Отмечается незначительный рост среднего уровня магнитного параметра и увеличение стандартного отклонения. При упругопластическом деформировании вследствие структурной неоднородности, обусловленной различной ориентацией

отдельных зерен и технологической обработкой, возникает неоднородность деформации.

Проведение циклического нагружения при напряжениях близких к  $0,3 \sigma_{0,2}$  приводит не только к уменьшению разброса, но и к смене знака интенсивности изменения стандартного отклонения магнитного параметра. Это может свидетельствовать об изменении механизма пластического деформирования после циклического нагружения  $0,3 \times 10^5$  циклов. Еще более выраженным является процесс для упрочненного дробеструйной обработкой материала. Приложение нагрузки приводит к снижению уровня коэрцитивной силы и увеличению разброса значений (см.табл. 2).

Результаты проведенных усталостных испытаний предварительно деформированных образцов в координатах  $N/N_p$  представлены на рис. 2 (где  $N$  - текущее значение цикла нагружения, а  $N_p$  – предельное состояние, после которого происходило разрушение). Следует отметить, что данная партия показала наименьшие значения стойкости.

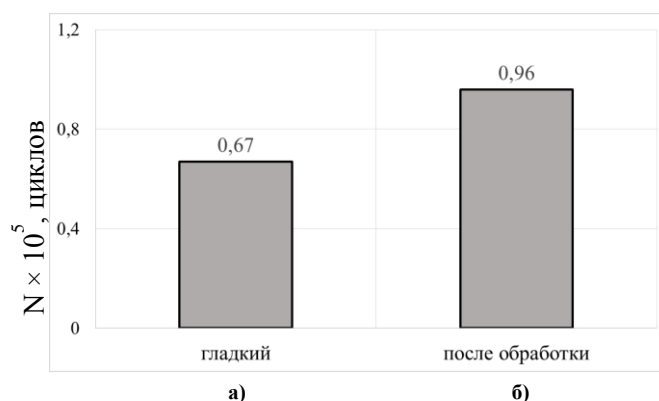


Рис.2 – Усталостная долговечность предварительно деформированных образцов при циклических испытаниях нагрузкой,  $\times 10^5$ : а –  $0,32 \sigma_{0,2}$ ; б –  $0,45 \sigma_{0,2}$  после упрочнения дробеструйной обработкой

Установлено (рис. 2), что для гладких образцов характерна пониженная усталостная долговечность –  $0,67 \times 10^5$  циклов, после которой происходит разрушение. Разрушение начинается от микротрещин, формирующихся на поверхности (рис. 3, а), о чем свидетельствует и фрактограмма поверхности разрушения (рис. 4, а). На снимке стрелками обозначены микротрещины на поверхности образцов. Для образцов, упрочненных дробеструйной обработкой зоной прогрессивного развития трещины послужило включение, являющееся концентратором напряжений и расположенное в приповерхностном слое (рис. 3 в, г) и (рис. 4, б). Наличие такого дефекта снизило усталостную долговечность упрочненных образцов до  $0,96 \times 10^5$  циклов, что, однако, выше в 1,43 раза в сравнении с гладкими неупрочненными.

Для гладких предварительно деформированных образцов характерно повышение магнитного параметра при увеличении количества циклов нагружения. Это связано с тем, что внутризеренная неоднородность порождает неравномерность макродеформации на отдельных малых участках образца, что и фиксирует магнитный параметр в самом начале испытаний (рис. 5, а). Наибольшая неоднородность имеет место в самом начале циклических нагружений при малых степенях деформаций. В этот период разброс значений максимален. С увеличением числа циклов неоднородность уменьшается и на некоторой стадии стабилизируется, а затем уменьшается вплоть до появления микротрещин перед разрушением. Образцы, обработанные дробеструйной обработкой, характеризуются отсутствием площадки увеличения магнитного параметра в начале испытаний (рис. 5, б). Это связано с тем, что упрочненный поверхностный слой ведет себя как разупрочняемый металл и циклические нагрузки не повышают плотность дефектов, а вызывают постоянно накапливаемую повреждаемость, которая по-разному реализуется

в пределах микрообъемов материала, что выражается в увеличении разброса значений.

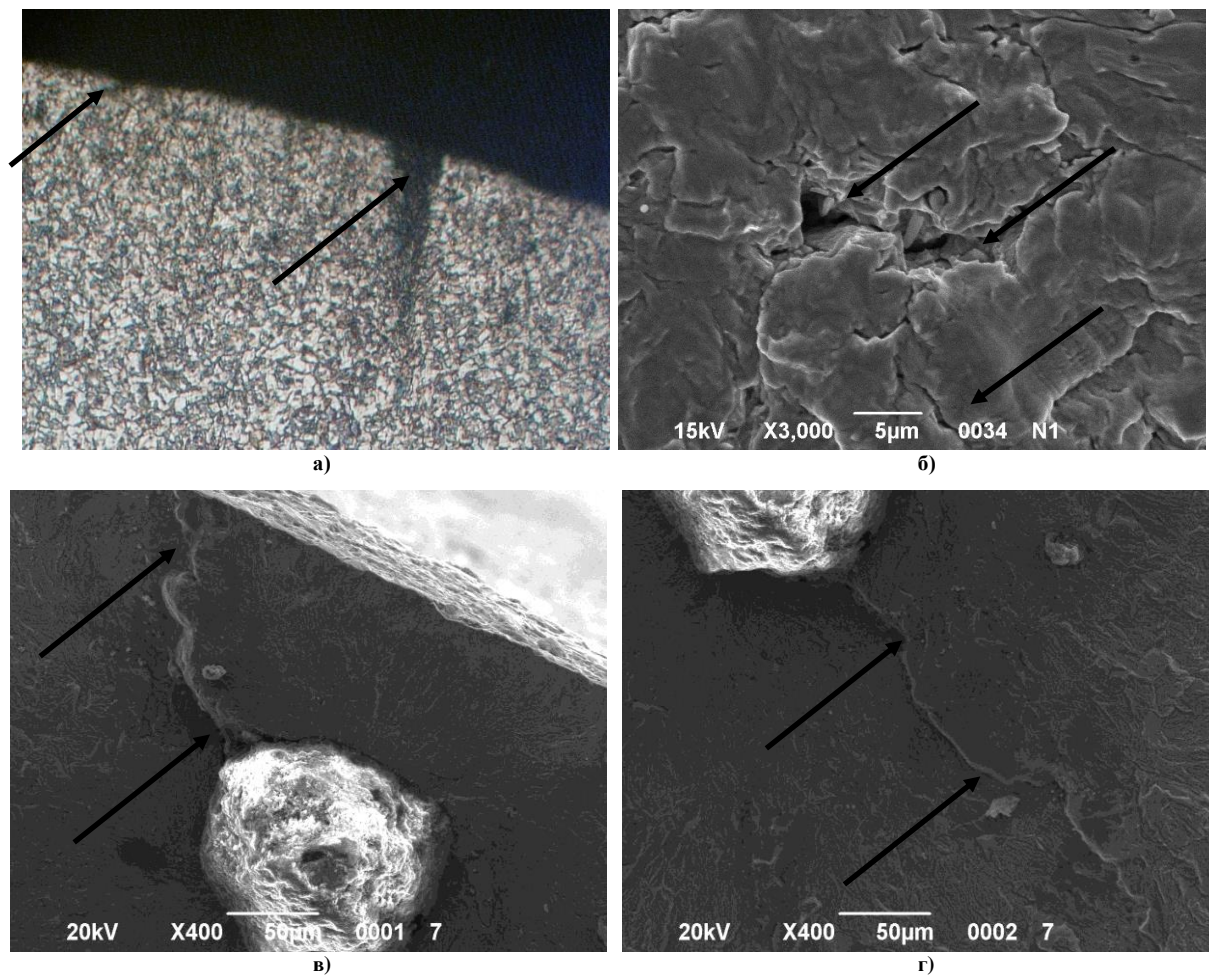


Рис.3 – Поверхностные трещины (обозначены стрелками) после  $0,67 \times 10^5$  циклов испытаний, предварительно деформированных образцов, при нагрузке  $0,32 \sigma_{0,2}$  и трещины от неметаллических включений расположенных у поверхности обработанных дробеструйной обработкой образцов после  $0,67 \times 10^5$  циклов при нагрузке  $0,45 \sigma_{0,2}$  (в, г): а – оптическая микроскопия,  $\times 100$ ; б-г – растровая микроскопия (увеличение указано на снимках)



Рис.4 – Поверхность излома гладкого образца после  $0,67 \times 10^5$  циклов под нагрузкой  $0,32 \sigma_{0,2}$  (а) и упрочненного дробеструйной обработкой после  $0,95 \times 10^5$  циклов под нагрузкой  $0,45 \sigma_{0,2}$  (б)

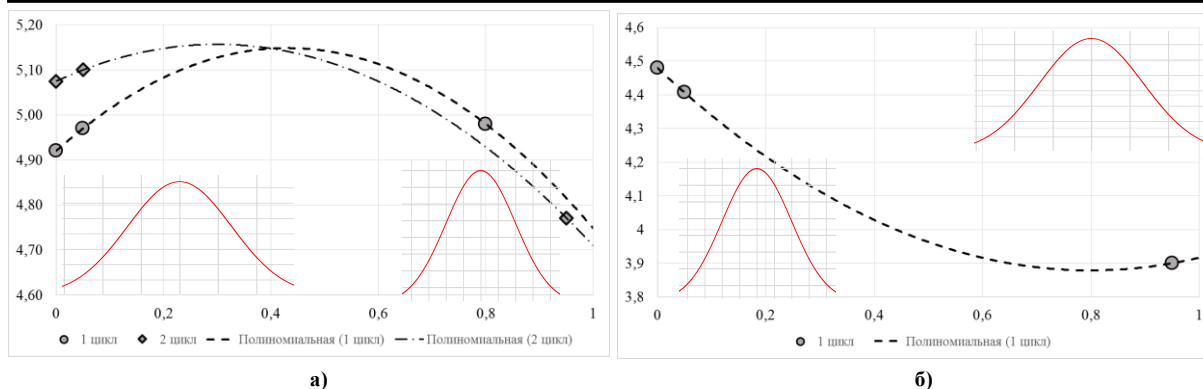


Рис. 5 – Изменение значений коэцитивной силы для гладкого образца при циклических испытаниях нагрузкой  $0,32 \sigma_{0,2}$  (а) и упрочненного дробеструйной обработкой при циклических испытаниях нагрузкой  $0,45 \sigma_{0,2}$  (б) на различных стадиях нагружения  $N/N_p$

Вторая серия испытаний была выполнена для установления возможности неразрушающей оценки структурной деградации материала в процессе эксплуатации под нагрузкой (табл.3). Образцы данной партии не подвергались предварительной пластической деформации.

Таблица 3

Значения  $H_c$  для второй серии измерений  
 (испытания на усталость при нагружении в сечении образца  $0,45 \sigma_{0,2}$ )

Число циклов испытаний, $\times 10^5$	Уровень $H_c$ по выборке <sup>1</sup> , А/см	
	mid	$\sigma$
В исходном состоянии под нагрузкой	4,30	0,027
0,89	4,33	0,010
1,79	4,40	0,008
2,68	3,82	0,007

Примечание. Серия испытаний предусматривала не менее 25 замеров на одном уровне, mid – средние значения,  $\sigma$  – стандартное отклонение по выборке.

Результаты проведенных усталостных испытаний представлены на рис. 6. Установлено, что для усталостная долговечность таких образцов существенно выше, чем предварительно деформированных в 4 раза для гладких и в 4,2 раза для упрочненных дробеструйной обработкой. Упрочняющая обработка более эффективна для недеформированных образцов. Так, усталостная долговечность гладких образцов составила  $2,68 \times 10^5$  циклов, а после обработки  $4,02 \times 10^5$  циклов.

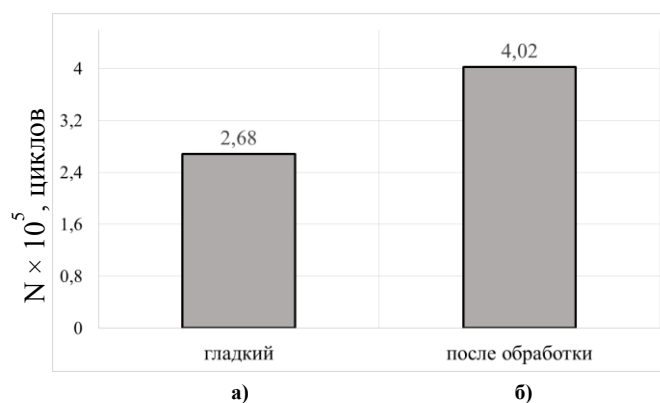


Рис.6 – Усталостная долговечность образцов при циклических испытаниях нагрузкой  $0,45 \sigma_{0,2}, \times 10^5$ :  
 а – гладкие образцы; б – после упрочнения дробеструйной обработкой

Особенностью данной группы образцов является некоторое повышение уровня

коэрцитивной силы перед их разрушением в период  $0,7-0,8 N/N_p$ , после которого происходит интенсивное снижение уровня магнитного параметра (рис. 7, а). Такое поведение характерно и для образцов, подверженных предварительной пластической деформации с тем отличием, что повышение уровня магнитного параметра менее значительно. В обоих случаях разброс значений магнитного параметра уменьшается с увеличением числа циклов испытаний (рис. 7, б).

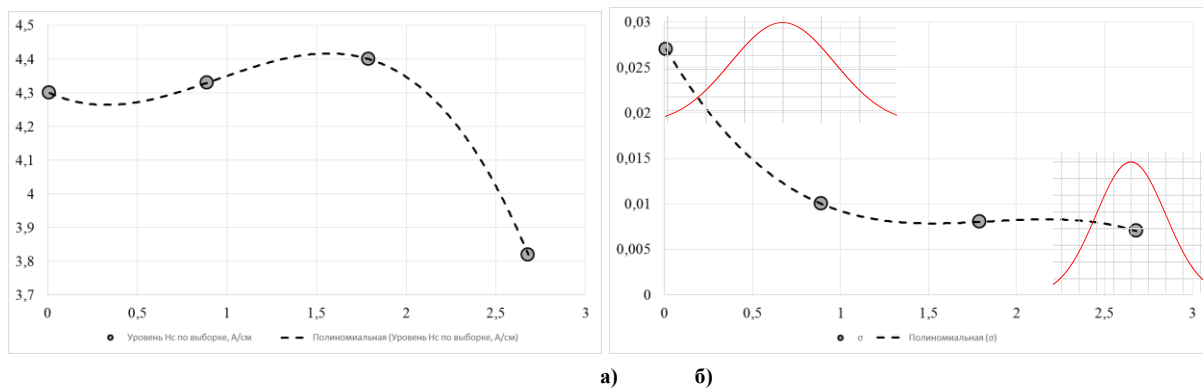


Рис.7 – Изменение значений коэрцитивной силы (а) и её стандартного отклонения (б) в зависимости от числа циклов нагружения гладкого образца при нагрузке  $0,45 \sigma_{0,2} \times 10^5$  циклов

### Выводы

Установлено, что дробеструйная обработка повышает усталостную долговечность для малоциклового участка как для предварительно деформированных образцов, так и исходных. Для участка малоциклового усталости после дробеструйной обработки поверхности характерно разрушение образцов от микротрещин усталости, которые развиваются преимущественно от структурных концентраторов напряжений - неметаллических включений. Развитие повреждаемости для гладких образцов начинается с формирования микротрещин на поверхности.

### Литература

1. Лозинский М.Г., Романов А.Н. Некоторые особенности развития тонкого микрорельефа на поверхности образцов поликристаллического железа в процессе испытания на усталость при высокотемпературном нагреве в вакууме//Физика металлов в металлословенье, 1967. Т22. Вып 1. С. 13-22.
2. Власовец В.М., Заец В.Н., Карабин В.В./ Методика оценки напряжений в сечении образцов при усталостных испытаниях / Научный журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» т5. 2016г – С 201-206.
3. Власовец В.М., Заец В.Н., Науменко А.А., Гринченко А.С., Алферов А.И., Рыбалко М.С., Шаммедов М.О. Повышение долговечности пружинных стоек культиватора в условиях циклических нагрузок при эксплуатации/ Научный журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів» т4. 2016г – С132-144.
4. Прочность при малоциклового нагружении/ С.В. Серенсен, Р.М. Шнейдерович, А.П. Гусев и др. М.: Наука, 1975. 286с.
5. Романов А.Н. Разрушение при малоциклового нагружении//М.: Наука, 1988. 276с.
6. Гусенков А.П., Романов А.Н. Влияние структурного состояния низколегированной стали на сопротивление малоциклового деформированию и разрушению//Металловедение и термическая обработка.1974. №12. С.18-20.

7. Прочность при малом цикле нагружения / Под редакцией С.В. Серенсена. М.: Наука, 1969. 268с.
8. Ghassemi-Armaki H., Maass R., Bhat S. P., Sriram S., Greer J. R., Kumar K. S. Deformation response of ferrite and martensite in a dual-phase steel // Acta Materialia. – 2014. – Т. 62. – С. 197-211.
9. Imandoust A., Zarei-Hanzaki A., Heshmati-Manesh S., Moemeni S., Changizian P. Effects of ferrite volume fraction on the tensile deformation characteristics of dual phase twinning induced plasticity steel // Materials & Design. – 2014. – Т. 53. – С. 99-105.

### **Summary**

**Vlasovets V.M., Zaets V.N., Serebrenikov M.A., Reshetniak V. N., Kyhtov V.G., Rubalko M.S.** Coercivity variance during fatigue testing of samples of low carbon steel

*In this article investigated the causes of low operational stability tines cultivator domestically produced and developed recommendations to improve their durability under cyclic loads.*

**Keywords:** cultivators rack, durability, low cycle fatigue, cyclic loading.

### **References**

1. Lozinskiy M.G., Romanov A.N. Nekotoryie osobennosti razvitiya tonkogo mikrorel'efa na poverhnosti obraztsov polikristalicheskogo zheleza v protsesse ispytaniya na ustalost pri vyisokotemperaturnom nagreve v vakuume//Fizika metallov v metallovedene, 1967. T22. Vyip 1. S. 13-22.
2. Vlasovets V.M., Zaets V.N., Karabin V.V./ Metodika otsenki napryazheniy v sechenii obraztsov pri ustalostnyih ispytaniyah / Naukoviy zhurnal «Tehnichnyi servis agropromislovogo, liсового ta transportnogo kompleksiv» t5. 2016g – S 201-206.
3. Vlasovets V.M., Zaets V.N., Naumenko A.A., Grinchenko A.S., Alferov A.I., Ryibalko M.S., Shammedov M.O. Povyshenie dolgovechnosti pruzhinnyih stoev kultivatora v usloviyah tsiklicheskih nagruzok pri ekspluatatsii/ Naukoviy zhurnal «Tehnichnyi servis agropromislovogo, liсового ta transportnogo kompleksiv» t4. 2016g – S132-144.
4. Prochnost pri malotsiklovom nagruzhenii/ S.V. Serensen, R.M. Shneyderovich, A.P. Gusekov i dr. M.: Nauka, 1975. 286s.
5. Romanov A.N. Razrushenie pri malotsiklovom nagruzhenii//M.: Nauka, 1988. 276s.
6. Gusenkov A.P., Romanov A.N. Vliyanie strukturnogo sostoyaniya nizkolegirovannoy stali na soprotivlenie malotsiklovomu deformirovaniyu i razrusheniyu//Metalovedene i termicheskaya obrabotka. 1974. №12. S.18-20.
7. Prochnost pri malom tsikle nagruzheniya / Pod redaktsiey S.V. Serensena. M.: Nauka, 1969. 268s.
8. Ghassemi-Armaki H., Maass R., Bhat S. P., Sriram S., Greer J. R., Kumar K. S. Deformation response of ferrite and martensite in a dual-phase steel // Acta Materialia. – 2014. – Т. 62. – С. 197-211.
9. Imandoust A., Zarei-Hanzaki A., Heshmati-Manesh S., Moemeni S., Changizian P. Effects of ferrite volume fraction on the tensile deformation characteristics of dual phase twinning induced plasticity steel // Materials & Design. – 2014. – Т. 53. – С. 99-105.