

УДК 539.431:621.891

СИЛОВЫЕ СИСТЕМЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ

С. А. ТЮРИН, Н. Н. МАЛЫК

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Выполнена классификация силовых систем механизмов движения комплекса для заготовки кормов К-Г-6 «Полесье», установлено, что все многообразие типоразмеров таких систем можно свести всего к трем моделям по видам износоусталостного повреждения: фреттинг-усталость, фрикционно-механическая усталость, контактно-механическая усталость. Для экспериментальной оценки взаимного и совместного влияния процессов фреттинга и механической усталости на работоспособность узлов комплекса К-Г-6 в сложных условиях нагружения предложена модель и разработан специальный метод износоусталостных испытаний. Практическая апробация разработанного метода показала, что полученные при его использовании результаты хорошо коррелируют с литературными данными. По результатам испытаний сделан вывод об эффективности разработанной методики и ее практической полезности.

Ключевые слова: сельскохозяйственная техника, силовая система, износоусталостное повреждение, моделирование, испытания.

AGRICULTURAL MACHINERY POWER SYSTEMS: MODELING AND TESTING

S. A. TYRIN, N. N. MALYK

Educational Institution “Sukhoi State Technical University of Gomel”, the Republic of Belarus

The article classifies the active systems of the motion mechanisms of the K-G-6 “Polesie” forage harvesting complex and found that the whole variety of standard sizes of such systems can be reduced to only three models – according to the types of wear-fatigue damage: fretting fatigue, mechano-sliding fatigue, mechano-rolling fatigue. For experimental evaluation of the mutual and joint influence of fretting and mechanical fatigue processes on the performance of units of the K-G-6 complex under difficult loading conditions, a model is proposed and a special method of wear-fatigue tests is developed. Practical approbation of the developed method showed that the results obtained with its use correlate well with the literature data. Based on the test results, a conclusion was made about the effectiveness of the developed method and its practical utility.

Keywords: agricultural machinery, active system, wear-fatigue damage, modeling, testing.

Введение

Проблемы прочности и износостойкости являются центральными в обеспечении надежности и ресурса современных машин и оборудования. При этом наиболее сложными и малоизученными являются закономерности комплексных износоусталостных повреждений. Последние обусловлены кинетическим взаимодействием явлений усталости, трения в любых его проявлениях, изнашивания и (или) эрозии. По имеющимся сведениям, в среднем более 90 % всех эксплуатационных отказов машин и оборудования происходит по причине развития таких повреждений.

Познание закономерностей износоусталостного повреждения наиболее эффективно вести экспериментальным путем. Результаты натурных экспериментов позволяют корректно установить характеристики сопротивления к деформации и разру-

шению конкретных деталей и узлов. Однако такой подход, будучи практически важным, в научном отношении малоэффективен. Натурный эксперимент, как правило, очень трудоемок, затратен и длителен, при этом дает ограниченные результаты, пригодные применительно к, например, исследованному узлу с деталями заданных типоразмеров. Следовательно, по нашему мнению, натурные испытания целесообразны лишь в весьма ответственных случаях.

Применительно к серийным и массовым изделиям машиностроения перспективным является научный подход, основанный на моделировании. Испытания моделей деталей и узлов, уменьшенных в разумных пределах, можно вести на универсальном испытательном оборудовании. Это резко снижает затраты и расширяет возможности испытаний по количеству испытуемых объектов. Результат – повышение точности оценки служебных свойств изделия, узла, детали.

Цель работы – провести исследование и анализ силовых систем механизмов движения комплекса для заготовки кормов К-Г-6 «Полесье» производства ОАО «Гомсельмаш», разработать и практически апробировать методику их модельных испытаний.

Основная часть

Классификация силовых систем комплекса для заготовки кормов

Выполним процедуру анализа силовых систем применительно к механизмам движения комплекса для заготовки кормов производства ОАО «Гомсельмаш».

Кормоуборочный комплекс К-Г-6 «Полесье» [1] состоит из универсального энергетического средства «Полесье-250» и полунавесного кормоуборочного комбайна «Полесье-3000» с набором адаптеров.

Комплекс предназначен для скашивания трав и силосных культур, в том числе кукурузы в фазе восковой спелости зерна, подбора массы из валков с одновременным измельчением и погрузкой в транспортные средства. Схема технологического процесса дана на рис. 1.

Универсальное энергетическое средство «Полесье-250» (рис. 2) с двигателем мощностью 250 л. с. снабжено реверсивным постом управления, передним и задним навесными устройствами и валами отбора мощности (ВОМ). Предназначено для работы в составе кормоуборочных комплексов и для агрегатирования с другими машинами сельскохозяйственного и коммунального назначения.

Конкретный анализ силовых систем выполнен применительно к механизмам движения комплекса для заготовки кормов. Задача состояла в том, чтобы выявить все типичные силовые системы и указать основные виды их возможного эксплуатационного износоусталостного повреждения. Введем обозначения: Δ – фреттинг-усталость (ФрУ), \bigcirc – контактно-механическая усталость (КМУ); \square – фрикционно-механическая усталость (ФМУ).

На рис. 3 показан конкретный пример анализа применительно к коробке диапазонов скоростей. При анализе выяснилось, что в этом узле на ФМУ работает 1, на КМУ – 6 и на ФрУ – 12 силовых систем.

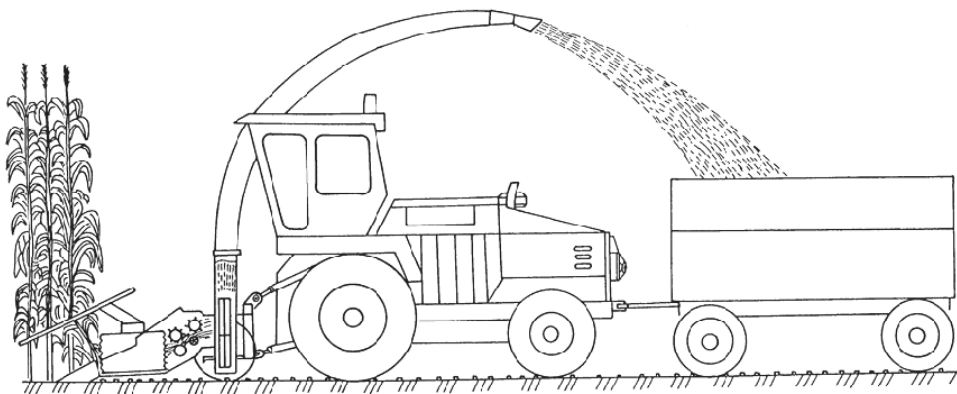


Рис. 1. Технологическая схема работы комбайна

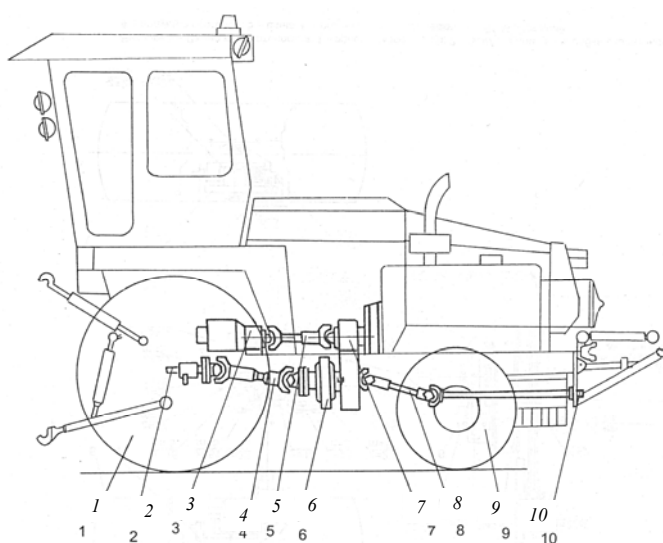


Рис. 2. Универсальное энергетическое средство «Полесье-250»:
 1 – мост ведущих колес; 2 – задний вал отбора мощности; 3 – привод гидронасоса ходовой части; 4, 5, 8 – валы карданные; 6 – редуктор цилиндрический; 7 – вал съема мощности; 9 – мост управляемых колес; 10 – передний вал отбора мощности

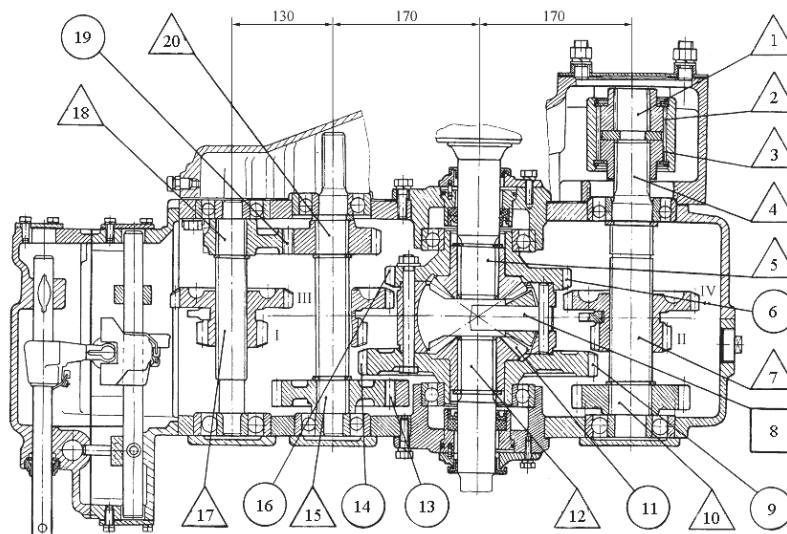


Рис. 3. Коробка диапазонов скоростей

Если выполнить подобный анализ по всем механизмам движения комплекса К-Г-6 «Полесье», который состоит из универсального энергетического средства «Полесье-250» и полунавесного кормоуборочного комбайна «Полесье-3000» с набором адаптеров, то можно установить, что в них содержится 125 типоразмеров силовых систем, которые можно классифицировать всего по трем видам износоусталостного повреждения: 85 силовых систем работают в условиях ФрУ, 36 – в условиях КМУ и 4 – в условиях ФМУ (см. таблицу).

Сводные данные о силовых системах комплекса для заготовки кормов

Износоусталостное повреждение	Силовые системы (натура)	Материал		Модель
		вала	втулки	
Фреттинг-усталость	Соединения: – шлицевые; – зубчатые; – шпоночные; – шпоночные конусные; – беззазорные. Всего 85 типоразмеров	40X, 45X, 18ХГТ, 25ХГТ, 20Х23Н18	20, 40, 40X, 18ХГТ, 25ХГТ, 12Х18Н10Т	Вал–втулка
		Всего 8 марок стали		
Контактно-механическая усталость	Зубчатые передачи. Шипы крестовины в игольчатых подшипниках. Всего 36 типоразмеров	25ХГТ 20Х (вал)		Ролик–ролик Вал–ролик
		Всего 2 марки стали		
Фрикционно-механическая усталость	Червячные передачи. Узлы с подшипниками скольжения. Всего 4 типоразмера	40X 20X 40X 35	ВЧ 55 (чугун) 25ХГТ ЛО90-1 (латунь) 35Л	Вал–втулка
		Всего 6 марок		

На ФрУ работают, как правило, соединения. В механизмах движения комплекса для заготовки кормов применяются 5 типов соединений: шлицевые, зубчатые, шпоночные, беззазорные, шпоночные конусные. На КМУ работают зубчатые передачи и шипы крестовин в игольчатых подшипниках. На ФМУ работают червячные передачи и узлы с подшипниками скольжения.

Для изготовления всех силовых систем используется 11 марок стали, 1 марка чугуна и 1 марка латуни. Согласно данным таблицы, все зубчатые передачи без исключения изготавливаются из стали одной марки (25ХГТ).

Если говорить о геометрических размерах силовых систем, то определяющий их геометрический параметр варьируется в основном в интервале от 10 до 1500 мм, т. е. более чем на два порядка.

Поскольку силовые системы являются, как правило, наиболее ответственными и тяжелонагруженными узлами машины, то обеспечение их требуемой эксплуатационной надежности становится задачей первостепенной важности.

Методы испытания моделей силовых систем

Как известно, надежность закладывается при проектировании и обеспечивается технологией. Но особая роль в ее количественной оценке на обеих этих стадиях принадлежит испытаниям.

В сельхозмашиностроении давно сложилась и получила широкую реализацию концепция приоритетности натуральных испытаний – от отдельных деталей и узлов до агрегатов и машин в целом [2–4].

Уже на первых этапах создания новой машины становится ясно, какие узлы должны быть испытаны на специальных стендах. Обычно это все виды коробок передач, элементы гидросистемы и закапотированная моторная установка. В отношении других узлов такой ясности нет, и перечень объектов для стендовых испытаний появляется лишь после первых полевых испытаний. Полнокомплектные испытания, проводимые на уникальных стендах в лабораторных условиях, позволяют выявлять такие узлы гораздо раньше и начать их доработку еще до полевых испытаний. Однако трудоемкость и стоимость таких испытаний весьма велики. К тому же они обладают одним серьезным техническим недостатком. При выходе из строя любого узла агрегата или даже отдельной детали машины испытания останавливаются на время анализа причин поломки, принятия решения и восстановления работоспособности. В силу этого коэффициент использования стенда для полнокомплектных испытаний существенно снижается. Поэтому полнокомплектные испытания в обязательном порядке дополняются испытаниями агрегатов и узлов, проводимыми на автономных стендах [5]. Все это ведет как к удорожанию испытаний, так и к увеличению сроков их проведения. В результате время, необходимое для создания и доводки машины по критериям надежности, растет.

Стендовые испытания узлов и агрегатов обнаруживают в свою очередь один существенный недостаток: результаты испытаний имеют ограниченное значение, они относятся лишь к тем типоразмерам объекта, которые предусмотрено испытывать на данном стенде. Если появляются иные типоразмеры объекта, надо строить новый стенд со всеми вытекающими последствиями.

В этой связи перспективной представляется идея модельных испытаний относительно небольших объектов. Ранее была установлена эффективность такого подхода: вместо 125 силовых систем комплекса для заготовки кормов целесообразным оказывается проводить ускоренные лабораторные испытания лишь трех типоразмерных моделей. Однако здесь возникает проблема (и весьма существенная): как осуществить моделирование и обратный переход от модели к натуре, чтобы получить достаточно достоверный прогноз сопротивления реальных силовых систем износоустойчивым повреждениям? Очевидно, что чем точнее испытания моделей силовых систем позволят оценить показатели надежности натуральных узлов в условиях, близких к эксплуатационным, тем значимее (и тем популярнее у специалистов) они будут.

Анализ, выполненный выше, показал, что все многообразие типоразмеров систем, содержащихся в механизмах движения кормоуборочного комплекса, можно практически свести всего к двум принципиально различающимся моделям (см. таблицу): вал–втулка и вал–ролик. При этом первая модель должна работать в условиях ФрУ либо ФМУ, тогда как вторая – в условиях КМУ.

К методам испытания моделей силовых систем следует предъявить несколько важных требований.

Во-первых, желательно унифицировать формы и размеры испытываемых объектов таким образом, чтобы свести к минимуму число их типоразмеров. Во-вторых, необходимо обеспечить корректность при сравнении результатов испытаний в различных условиях.

Поэтому испытываемые объекты должны быть лабораторными, т. е. малоразмерными. Это также должны быть не микрообразцы, а макрообразцы (в техническом смысле), тем самым обеспечивается экономичность испытаний.

Режимы испытаний должны предусматривать изменение определяющих нагрузок и скоростей в таких широких интервалах, чтобы иметь возможность проведения испытаний в любых условиях – от работы при штатных нагрузках вплоть до дости-

жения предельного состояния за относительно короткое время. Следовательно, необходимо обеспечить форсированные (или ускоренные) испытания.

Желательно иметь полностью автоматизированную испытательную машину с широкими возможностями и малыми погрешностями измерения, регистрации и анализа опытных данных.

С целью выполнения этих основных требований были разработаны и в значительной степени стандартизованы соответствующие методы износоусталостных испытаний в типичных условиях [6]. Методы основываются на базовом цилиндрическом образце с диаметром 10 мм в рабочем сечении.

Методика испытаний

Фреттинг-усталость – износоусталостное повреждение, обусловленное кинетическим взаимодействием явлений механической усталости и фреттинга, приводящее к образованию и развитию в детали магистральной трещины [7]. В результате в системе возникает комплексное износоусталостное повреждение – излом вследствие циклического деформирования плюс фреттинг-процесс (совокупность механических, физических, тепловых и электрических процессов, которые развиваются в зонах контакта образца и контрообразцов при малых колебательных смещениях одной поверхности относительно другой) [8].

К настоящему времени проблема фреттинга недостаточно изучена. Необходимы дополнительные исследования причин возникновения этого вида (и подвидов) износа, изучение характера протекания процессов во фреттинг-контакте и повреждения поверхностей взаимодействия тел.

Повреждения поверхностей вследствие износа и коррозии при фреттинге служат концентраторами напряжений и снижают предел выносливости материала деталей. В случае удаления продуктов износа из зоны трения происходит ослабление посадок с натягом, возрастание вибраций. Анализ, выполненный выше, показал, что в механизмах движения комплекса К-Г-6 «Полесье» из 125 типоразмеров силовых систем 85 систем (более 60 %) работают в условиях ФрУ. На ФрУ работают, как правило, соединения типа вал–втулка.

На рис. 4 представлена схема испытаний на ФрУ и основные размеры образца и контрообразцов. При ФрУ к рабочей зоне вращающегося цилиндрического образца 1, изгибаемого нагрузкой Q , прижимают контактной нагрузкой F_N два контрообразца 3, называемые мостиками фреттинга.

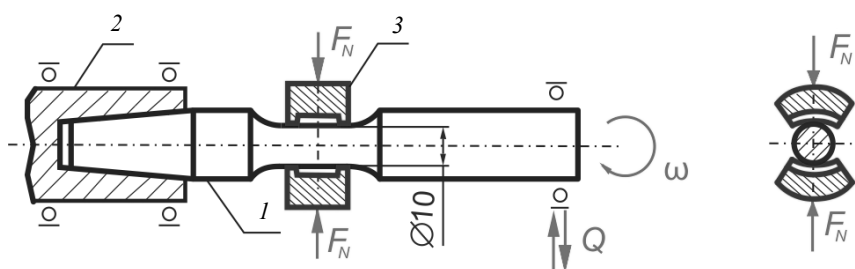


Рис. 4. Схема испытаний на фреттинг-усталость:
1 – образец; 2 – шпиндель; 3 – контрообразцы (мостики фреттинга)

Проводят испытания на ФрУ различных пар материалов с целью определения влияния контрообразцов-мостиков фреттинга из различных материалов на предел выносливости конструкционных сталей (пары трения сталь–сталь, сталь–чугун ВЧТГ, сталь–бронза, сталь–алюминий и др.). Методика предусматривает построение кривых усталости согласно требованиям ГОСТ 25.502–79.

Испытания на ФрУ проводят на испытательной машине UBM фирмы Walter+Bai AG при частоте 3000 мин^{-1} . К рабочей зоне вращающегося цилиндрического образца, изгибаемого нагрузкой Q , прижимают контактной нагрузкой F_N два контробразца (мостика фреттинга).

Основные характеристики сопротивления ФрУ определяют по кривой ФрУ. Для построения кривой ФрУ испытывают не менее 12 одинаковых пар материалов. Испытания образцов проводят непрерывно до достижения предельного состояния или до базового числа циклов. Критерий предельного состояния – разделение образца на две части. База испытаний N_B при определении предела выносливости σ_{-1q} составляет $3 \cdot 10^6$ циклов. В интервале напряжений $0,95-1,05$ от значения предела выносливости σ_{-1q} должны быть испытаны не менее четырех образцов, при этом не менее двух из них должны быть испытаны до N_B без достижения предельного состояния.

Из кривой ФрУ определяют следующие основные характеристики: предел выносливости σ_{-1q} ; абсциссу точки перелома кривой ФрУ $N_{G\sigma q}$; показатель наклона левой ветви кривой ФрУ $m_{\sigma q}$.

Результаты испытаний

Серия образцов из нормализованной стали 45 испытана на механическую усталость и ФрУ. В качестве контробразцов использовали мостики фреттинга, изготовленные из следующих материалов: сталь 25ХГТ, чугун ВЧГГ, бронза, алюминий. Полученные по результатам испытаний кривые усталости и ФрУ приведены на совмещенном графике (рис. 5).

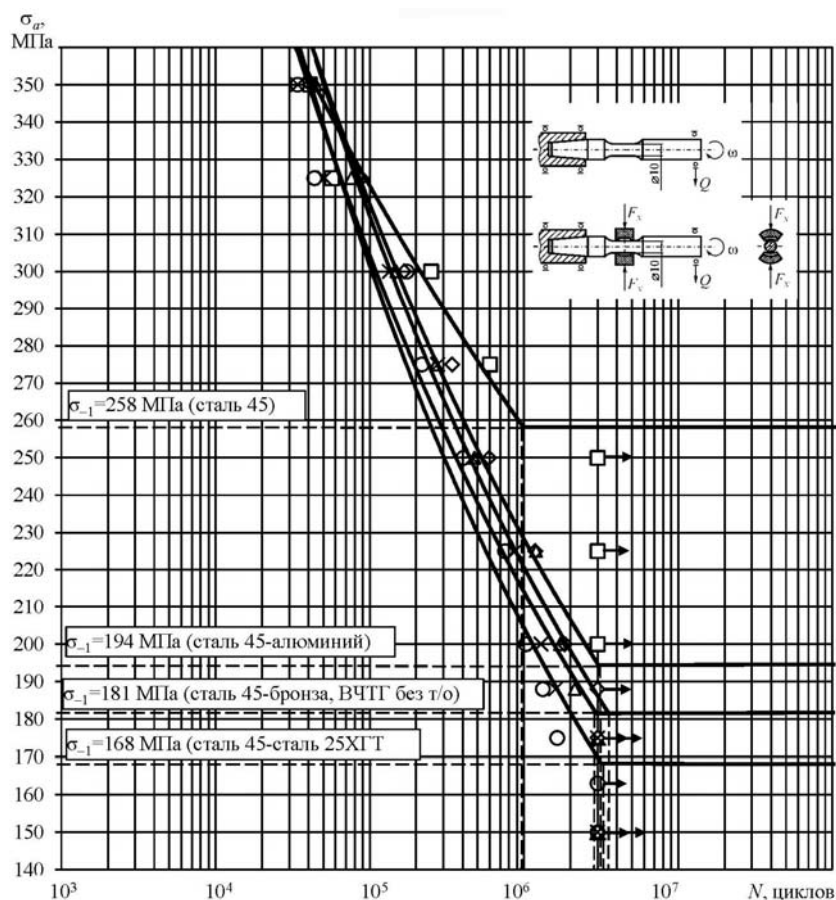


Рис. 5. Кривые механической усталости и фреттинг-усталости стали 45

Анализ результатов испытаний показал существенное снижение как предела выносливости, так и показателя наклона кривой усталости для всех пар материалов. При этом величина снижения различна для определенных сочетаний материалов. В условиях эксперимента наибольшее снижение предела выносливости произошло для сочетания материалов сталь 45–сталь 25 ХГТ (90 МПа – на 35 %), наименьшее – сталь 45–алюминий (64 МПа – на 25 %). Полученные результаты хорошо коррелируют с литературными данными. В частности, по данным работы [9], фреттинг-повреждение обуславливает значительное снижение предела выносливости: до 50 % на базе $3 \cdot 10^6$ циклов. При этом величина снижения различна для пар трения из разных материалов.

Таким образом, практическая апробация разработанной методики испытаний на ФрУ выполнена успешно. По результатам испытаний можно сделать вывод о ее эффективности и практической полезности.

Заключение

Успешная практическая апробация разработанной методики модельных испытаний на ФрУ по результатам экспериментов показала ее работоспособность, эффективность и практическую полезность. Испытания моделей деталей и узлов, уменьшенных в разумных пределах и ведущихся на универсальном испытательном оборудовании, резко снижают затраты и расширяют возможности испытаний по количеству испытываемых объектов.

В результате таких испытаний определяют количественные характеристики сопротивления износоусталостным повреждениям. А именно износоусталостные повреждения и в частности ФрУ, как известно, приводят к преждевременным выходам из строя современных машин, в том числе сельскохозяйственной техники (до 80–90 % отказов).

Эти характеристики могут быть использованы при выборе конструкционных материалов и обосновании конструктивно-технологических решений, при контроле качества материалов, при расчетах на этапе проектирования и др. Результат – повышение точности оценки служебных свойств изделия, узла, детали.

Для испытания таких моделей создано высокотехнологичное испытательное оборудование, технические характеристик которого регламентируются требованиями межгосударственного стандарта.

Литература

1. Шантыко, А. С. Развитие наукоемкого сельскохозяйственного уборочного машиностроения в ОАО «Гомсельмаш» / А. С. Шантыко // Вестн. Нижегород. гос. с.-х. акад. – 2020. – № 3 (27). – С. 72–74.
2. Бондарев, А. В. Анализ системы испытаний сельскохозяйственной техники / А. В. Бондарев, С. А. Горелов // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве : сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 24–25 нояб. 2022 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т. – Минск, 2022. – С. 191–195.
3. Стопалов, С. Г. Ремонт и испытания тракторов и сельскохозяйственной техники как способ обеспечения надежности / С. Г. Стопалов // Сельскохозяйств. техника : обслуживание и ремонт. – 2013. – № 7. – С. 42–49.
4. Палессе: эффективность, подтвержденная испытаниями // Новое сел. хоз-во. – 2015. – № 5. – С. 13.
5. Управление надежностью сельскохозяйственной техники методами диагностики и триботехники / В. П. Миклуш [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2019. – 392 с.
6. Экспериментальная механика локальных повреждений: методы исследований

- и некоторые результаты / О. М. Еловой [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – 2020. – Вып. 9. – С. 166–175.
7. Петухов, А. Н. Фреттинг и фреттинг-усталость конструкционных материалов и деталей / А. Н. Петухов // Авиац. пром-сть. – 2014. – № 4. – С. 45–50.
 8. Гура, Г. С. Качение тел с трением. Фреттинг : монография / Г. С. Гура. – Сочи : Дория, 2009. – 294 с.
 9. Тюрин, С. А. Фреттинг-усталость : изучение закономерностей при различном сочетании материалов / С. А. Тюрин, П. С. Дробышевский // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4 нояб. 2020 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2020. – С. 112–113.

References

1. Shantyko A. S. Development of science-intensive agricultural harvesting machine building in JSC "Gomselmash". *Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*, 2020, no. 3 (27), pp. 72–74 (in Russian).
2. Bondarev A. V., Gorelov S. A. Analysis of the testing system for agricultural machinery. *Tekhnicheskoye obespecheniye innovatsionnykh tekhnologiy v sel'skom khozyaystve: sb. nauch. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 24–25 noyab. 2022 g.* [Technical support of innovative technologies in agriculture: sat. scientific art. International scientific-practical. conf., Minsk, November 24–25, 2022]. Minsk, 2022, pp. 191–195 (in Russian).
3. Stopalov S. G. Repair and testing of tractors and agricultural machinery as a way to ensure reliability. *Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivaniye i remont*, 2013, no. 7, pp. 42–49 (in Russian).
4. Palesse: effectiveness confirmed by tests. *Novoye sel'skoye khozyaystvo*, 2015, no. 5, p. 13 (in Russian).
5. Miklush V. P., Dunaev A. V., Tarasenko V. E., Karpovich S. K., Zhdanko D. A., Lisay N. K. *Reliability management of agricultural machinery by methods of diagnostics and tribotechnics*. Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi agrarnyi tekhnicheskii universitet, 2019. 392 p. (in Russian).
6. Yelovoy O. M., Bogdanovich A. V., Tyurin S. A., Komissarov V. V. Experimental mechanics of local damage: research methods and some results. *Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. trudov* [Topical issues of mechanical engineering: collection of scientific papers], 2020, iss. 54, pp. 166–175 (in Russian).
7. Petukhov, A. N. Fretting and fretting fatigue of structural materials and parts. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2014, no. 4, pp. 45–50 (in Russian).
8. Gura G. S. *Rolling bodies with friction. Fretting*. Sochi, Doriya Publ., 2009. 294 p. (in Russian).
9. Tyurin S. A., Drobyshevskiy P. S. Fretting-fatigue: the study of regularities with different combinations of materials. *Innovatsionnyye tekhnologii v agropromyshlennom komplekse – segodnya i zavtra: tez. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gomel', 4 noyab. 2020 g.* [Innovative technologies in the agro-industrial complex – today and tomorrow: abstract report International scientific-practical. conf., Gomel, November 4, 2020]. Gomel', 2020, pp. 112–113 (in Russian).