

К ВОПРОСУ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ДИСКОВ НА ОСНОВЕ ВИБРАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ И ЗНАКОПЕРЕМЕННОГО ИЗГИБА

Б.А. Гупалов¹, В.В. Закураев¹, В.Ш. Петренко²

¹Новоуральский технологический институт НИЯУ «МИФИ», г. Новоуральск, Россия

²ГСКТБ по механизации, г. Бровары, Украина

Маложесткими деталями являются такие детали, у которых один из геометрических параметров намного больше, чем все остальные. В работе рассматриваются различные технологии и оборудование для осуществления правки таких маложестких деталей, как фрикционные диски. Внешний диаметр дисков в десятки и даже сотни раз больше, чем их толщина. Такие конструктивные особенности создают сложности при их изготовлении. Задача придания правильной формы детали сложнее, чем соблюдение допусков на размеры. Поэтому иметь технологии и оборудование, которые позволили бы придать необходимую форму маложестким деталям, важно для современного производства. Важно и то, что исследования, проведенные авторами работы, позволяют утверждать, что прогрессивные технологии правки могут создать условия в материале деталей, которые позволяют сохранять правильную геометрическую форму детали после изготовления в течение 1000 часов и более.

Отличительной чертой современных технологий правки маложестких изделий является создание динамических воздействий на их рабочие поверхности. В процессе правки на их рабочих поверхностях создаются микропластические деформации разного вида, в том числе изгибы. Циклический характер правки деталей создаёт условия для релаксации остаточных напряжений в материале изделий, что благоприятно отражается на стабилизации их геометрических параметров во времени. При этом при динамической правке изделий в определенных режимах не происходит потерь в эксплуатационном ресурсе работы изделий. Наоборот, правильная форма изделий создаёт условия для увеличения долговечности маложестких изделий.

В работе делается попытка обобщить информацию по технологии правки фрикционных дисков на основе исследований, выполненных авторами настоящей работы в разные годы. В статье раскрываются пути совершенствования технологии правки с целью придания изделиям правильной геометрической формы.

Ключевые слова: фрикционные диски, технология правки дисков, маложесткие детали, релаксация напряжений, динамическая стабилизация геометрических параметров, виброправка деталей, знакопеременное нагружение, режимы правки.

Введение

В узлах машин и механизмов очень часто применяются маложесткие, или, как их еще называют, нежесткие детали. Под маложесткими или нежесткими понимаются детали, у которых один из конструктивных параметров превышает в несколько раз все остальные. Примерами таких деталей могут служить длинномерные валы – торсионы танков, тонколистовые фланцы, кольца, диски, возможно, тонкостенные корпусные детали и др. Диспропорция в конструктивных параметрах деталей приводит к тому, что на производстве не всегда удается добиться изготовления деталей с минимальным браком или отсутствием такового. Требуется подходить к отладке технологического процесса более внимательно. В этом смысле для производства таких деталей задача выдерживания допуска формы, например прямолинейности, неплоскостности или др., которые могут измеряться в сотых и тысячных долях миллиметра, гораздо сложнее, чем выдерживание допуска на геометрические размеры. В литературе [1–3] данный вопрос освещается достаточно широко.

Одними из представителей таких деталей являются фрикционные диски. Они характеризуются незначительной толщиной кольцевого полотна – от 1 до 8 мм, при этом диаметр диска мо-

Технология

жет быть от 40 до 950 мм. Такое сочетание геометрических характеристик и представляет особый интерес ввиду сложности получения дисков с точными геометрическими параметрами по плоскостности от 0,15 до 0,5 мм.

Фрикционные диски входят в состав трансмиссии дорожно-строительных и специальных машин: тракторов, экскаваторов, танков, аналогичных военных машин и т. д. Эти детали обеспечивают передачу механической нагрузки от двигателя к ходовой части. Диски работают с большим числом циклов переключений. Как правило, нагрузка является неравномерной. Такие факторы приводят к увеличению вероятности их отказов. Известно, что отказы по дискам составляют до 30 % от всех отказов трансмиссий и более 2 % отказов для танков [4]. Данный факт свидетельствует о том, что качество и надежность деталей будут отражаться на долговечности машины в целом.

Поломка или отказ узла машины приводит к ее простою и экономическим потерям. Вопрос качества и надежности узлов машины является более важным для военной техники, чем для машин гражданского назначения. Сложно себе представить, что во время боевых действий у танка выйдет из строя трансмиссия. Поломка приведет к потере маневренности машины и, как следствие, выживаемости боевого расчета.

Фрикционные диски, внешний вид которых представлен на рис. 1, имеют существенные конструктивные различия в зависимости от функционального назначения.



Рис. 1. Внешний вид фрикционных дисков различного функционального назначения

Требование обеспечения отклонения от плоскостности рабочих поверхностей дисков в заданных пределах определено неслучайно. Дело в том, что, как отмечается в работе [5], недостаточная точность рабочих поверхностей дисков ведет к уменьшению площади контакта и к возрастанию температуры. Это, во-первых, приводит к увеличению дополнительного тормозного момента и сил трения. Во-вторых, рост температуры приводит к заклиниванию дисков, увеличению биения торцевого полотна и выходу узла из строя. Так, например, для ведомых дисков сцепления диаметром 200–450 мм торцевое биение фрикционного полотна относительно оси вращения должно быть в пределах 0,5–0,8 мм.

Выпуском фрикционных дисков занимаются многие отечественные и зарубежные предприятия. Среди них можно отметить такие, как Белорусский автомобильный завод (Белоруссия), ОАО «Могилевский ремонтный завод» (Белоруссия), «Ровенский завод тракторных агрегатов» (Украина), «Харьковский завод тракторных самоходных шасси» (Украина), моторный завод «Антон Иванов» (Болгария), ОАО «НПК «Уралвагонзавод» им. Ф.И. Дзержинского» (Россия), Челябинский тракторный завод (Россия) и др.

Известны современные западные предприятия, в том числе и полного цикла, по изготовлению фрикционных дисков: Miba (Австрия), Prodan GmbH (Германия), Horbiger (Германия), Ortlinghaus-Werke GmbH (Германия), Pramet (Чехия), Raybestos Powertrain (США), GMP Friction products (США), Carlisle brake and friction (США) и др. Детальями, произведенными ими, снабжаются многие тяжёлые машины и трактора с мировым именем: Kamatsu (Япония), Caterpillar (США), Zetor (Великобритания), в том числе и российские. Например, фрикционные диски фирмы Miba применяются в новом тракторе «Слобожанец» серии ХТА-250.

Авторы настоящей работы, изучив технологию изготовления фрикционных дисков, пришли к выводу, что она является идентичной с небольшими изменениями на многих предприятиях. Например, на ОАО «НПК «Уралвагонзавод» им. Ф.И. Дзержинского» (Россия) заготовку получают методом вырубki из листа различных марок сталей: 65Г, 30ХГСА и др. Далее заготовку подвергают термической обработке для получения твердости в среднем 23...35 НRC, протягивают эвольвентные шлицы и шлифуют по плоскостям до получения необходимых размеров. После этого диски отправляют в соответствующий отдел предприятия, где параметры деталей подвергают контролю точности изготовления. Весь контроль точности изготовления деталей ведется специалистами по чертежам деталей, где указаны их основные геометрические размеры, допуски формы, шероховатость, технические требования и др. Часть деталей, которые не прошли контроль, в случае, если брак исправимый, отправляют на операцию правки. В качестве операции правки, как правило, применяют рихтовку полотна диска молотком на плите, т. е. приложением однократной ударной нагрузки. После этого детали вновь подвергают контролю достижения параметра допуска по плоскостности формы полотна дисков.

В конце технологического процесса изготовления деталей металлическую основу дисков отправляют на операцию напыления фрикционного слоя на их рабочих поверхностях.

Проведенные нами исследования [6] показывают, что описанный выше технологический процесс изготовления деталей не может гарантировать выпуск деталей с нужным качеством. Даже использование технологических операций традиционной правки деталей (рихтовки деталей вручную на плите и низкотемпературный отпуск их в штампе) все равно приводит к следующему результату. Около 50 % изделий все равно не укладываются в требуемый допуск по плоскостности, а максимальный размах отклонений формы дисков может составлять до 0,5 мм. Такие данные получены при изготовлении дисков с внешним диаметром 170 мм, причем эти цифры получены на металлической основе до напыления фрикционного слоя. В этой связи представляется интересным мнение некоторых специалистов в области порошковой металлургии, которые утверждали, что для напыления фрикционного слоя плоскостность формы не важна. Требование допуска формы по плоскостности может и не выполняться в этом случае. Данные специалисты всецело полагали, что фрикционный слой может «сгладить» неровности формы полотна диска. По мнению же авторов настоящей работы, следует не согласиться с таким утверждением. Дело в том, что диск с его неровной металлической основой во время эксплуатации будет весьма неустойчив в работе. Этот факт приведет к быстрому растрескиванию фрикционного слоя, повышению износа и отказу диска раньше окончания его срока службы.

В процессе изготовления деталей под воздействием механической и теплофизической нагрузки формируются внутренние напряжения в материале. После снятия такой нагрузки происходит формирование неравномерного поля остаточных напряжений в материале деталей. Дальнейшие процессы релаксации и перераспределения значительного уровня остаточных напряжений приводят к самопроизвольному изменению их формы. Процессы традиционных методов правки диска не оказывают существенного влияния на уровень остаточных напряжений, что и не дает результата в придании правильной формы дискам.

Следует отметить, что до настоящего времени общее решение проблемы снижения количества бракованных изделий отсутствует. Продолжаются поиски эффективных технологических способов стабилизации геометрических размеров и снятия остаточных напряжений в процессе изготовления фрикционных дисков. Авторы работы уверены, что задача может быть решена только с помощью применения в технологии изготовления деталей прогрессивных методов динамической правки с циклическим характером нагружения.

Авторы настоящей работы являются производителями и исследователями в области динамической правки маложестких дисков и постоянно ведут работу над совершенствованием технологий правки. Целью настоящей работы является ознакомить читателей с последними достижениями в области динамической правки фрикционных дисков, представив разные способы для её осуществления.

1. Правка фрикционных дисков на основе вибрационного нагружения

Авторами настоящей работы предложен способ вибрационной правки изделий [7]. Последовательность действий при правке по новому способу выглядит так. В начале производят измере-

ния геометрических параметров дисков и выявляют величину отклонений от допускаемых значений. Замеры деформации ведутся путем вращения диска на плите и регистрации углового шага волны деформации. Это необходимо для задания режимных параметров правки.

Далее изделие устанавливают на опоры для создания обратного прогиба («заневоливания»). Затем подвергают изделие циклическим колебаниям с частотой нагружения в диапазоне 0,5–1,5 собственной частоты колебаний изделия. При этом амплитуда вынужденных колебаний (A) должна иметь величину, равную 0,1–0,2 значения деформации (Δc), создаваемой статической нагрузкой Q при заневоливании диска. Время процесса правки равно $t_n = N/\omega$, где N – число циклов нагружения, соответствующее стадии циклической микротекучести ($N \leq 10^4$), ω – частота вынужденных колебаний. Схема процесса правки представлена на рис. 2.

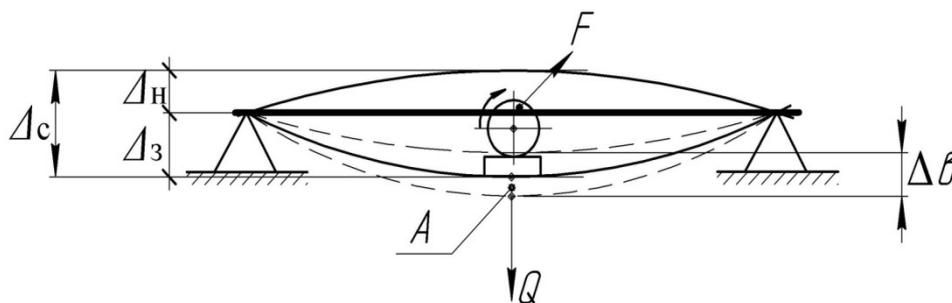


Рис. 2. Схема вибрационной правки маложёстких деталей: Q – нагрузка статическая для создания Δc ; F – возмущающая сила для создания Δv ; A – амплитуда колебаний (наибольшая); Δ_n – начальный прогиб изделия, равный отклонению от правильной геометрической формы; Δ_z – величина перегиба изделия («заневоливания»); $\Delta c = \Delta_n + \Delta_z$ – статическая деформация в результате наложения статической нагрузки Q

Способ виброправки позволяет целенаправленно воздействовать на деформированные рабочие поверхности дисков в результате их коробления, запустив механизм релаксации остаточных напряжений на минимальном энергетическом уровне нагружения, и в итоге, вести процесс правки деталей на безопасных технологических режимах. Это значит, что ведение процесса правки происходит на таких режимах, при которых не допускается потеря ресурса работы изделия. Этому способствует то, что время процесса правки, а значит, и релаксации напряжений составляет всего несколько минут, а характер нагружения изделий соответствует одностороннему циклу колебаний.

Условия, при которых происходит релаксация остаточных напряжений при вибрационной обработке деталей, отмечались рядом исследователей [8]. Авторами настоящей работы выяснено, что все проявления процессов деформации, разрушения, а также релаксации напряжений в различных по строению и свойствам твердых телах могут быть описаны с одинаковых кинетических позиций. На основе исследований, выполненных академиком С.Н. Журковым и его учениками, для управления процессом правки определена величина перегиба, или «заневоливания» деталей, которая определяется зависимостью:

$$\Delta z = \Delta_n \cdot R \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot D \cdot \beta_{II} \cdot \xi}{(\alpha - \ln(B) + \ln(k)) \cdot T \cdot C}}, \quad (1)$$

где Δz – величина обратного перегиба, или «заневоливания» детали, м; σ_T – предел текучести материала, Па; R – постоянный коэффициент $\approx 0,3 \div 0,6$; ξ – размерный коэффициент, м²; T – температура испытаний, К; Δ_n – прогиб диска, равный отклонению от плоскостности, м; α , β_{II} , B , k – постоянные коэффициенты; ω – частота вынужденных колебаний, Гц; D – логарифмический декремент свободных затухающих колебаний; C – жёсткость диска, Н/м.

Полученное соотношение (1) позволило произвести оценку величины работы необратимой деформации за единичный цикл (ΔW) и суммарной работы, рассеиваемой за один период деформации (W):

$$\Delta W = \left(\frac{A \cdot \Delta z \cdot C}{\Delta_n \cdot R \cdot \sigma_T} \right)^2 \cdot \frac{T \cdot (\alpha - \ln(B) + \ln(k))}{\omega \cdot \beta_{II} \cdot \xi}. \quad (2)$$

Если в (2) подставить следующие значения коэффициентов: $\alpha = 8,33$; $\beta = 3,3 \cdot 10^5$; $T = 293$ К; $\sigma_T = 785 \cdot 10^6$ Па; $\xi = 1,178 \cdot 10^{-13}$ м²; $B = 2,7 \cdot 10^{-4}$; $k = 9,7 \cdot 10^7$; $A = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м; $C = 3,4 \cdot 10^4$ Н/м; $\Delta z = 4,16 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta n = 0,3 \cdot 10^{-3}$ м; $\omega = 80$ Гц; $R = 0,3 \div 0,6$, то $\Delta W = 3,8 \cdot 10^{-5}$ Дж при энергии колебаний всего образца $W' = 1,53 \cdot 10^{-3}$ Дж. За весь период правки ($N = 10^4$) $\Delta W = 0,4$ Дж при $W' = 15,3$ Дж.

Результаты выполненных исследований показали, что «исправляемость» дисков обеспечивается при отношении $\Delta z / \Delta n \approx 10$ единиц. При пересчёте величины деформации в создаваемые напряжения получено следующее соотношение $\sigma_z / \sigma_0 \leq 10$, где σ_z – нормальные напряжения, создаваемые в материале статической нагрузкой Q при заневоливании диска; σ_0 – нормальные остаточные напряжения в материале диска.

Количество циклов нагружения (N) для осуществления эффективного и безопасного процесса виброправки не должно выходить за $(1 \div 1,5) 10^4$ циклов, что соответствует стадии циклической микротекучести материала. Учитывая, что базовое число количества циклов, необходимое до разрушения деталей, равно 10^7 . Поэтому, взяв отношение 10^4 к 10^7 и опустив преобразования, мы получим, что потеря ресурса работы деталей составит 0,1 %.

Принципы, которые заложены в способе вибрационной правки маложестких изделий [7], позволили сотрудникам АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» разработать способ правки сварных конструкций [9]. Как отмечается исследователями [10, 11], деформирование сварных конструкций происходит от тепловых нагрузок и формирования значительного уровня внутренних напряжений, которые влияют на усталость материала. Способ правки [9] позволяет стабилизировать геометрические размеры крупногабаритных конструкций, воздействуя на остаточные напряжения в их материале. Механизм релаксации остаточных напряжений в сварных соединениях под циклической нагрузкой описан достаточно полно в работе [12].

Оборудование для практической реализации технологии виброправки фрикционных дисков представлено на рис. 3.

Существует возможность ведения вибрационной правки в автоматизированном режиме. Концептуально спроектирован робото-технологический комплекс (РТК) для осуществления контроля, сортировки, подачи и непосредственно вибрационной правки дисков. На основе алгоритма работы РТК в графической среде программирования LabVIEW компании National Instruments (США) разработан виртуальный прибор – пульт оператора РТК.

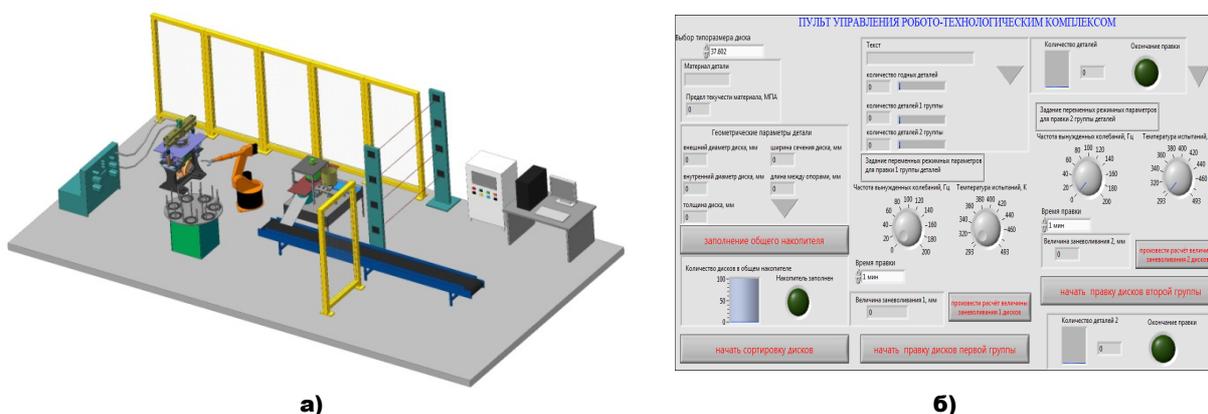


Рис. 3. Концептуальное оборудование для технологии виброправки дисков:
а) 3D-модель РТК; б) виртуальный прибор – пульт оператора РТК

На основе вышеописанных разработок исследователи [13] из других стран продолжают совершенствовать и дорабатывать оборудование для виброправки. Они двигаются в направлении глубокой автоматизации, прорабатывая и предлагая новые полезные модели для производства.

2. Правка фрикционных дисков на основе знакопеременного изгиба полотна диска между правящими роликами. Особенности процесса ротационной правки, результаты

Процесс правки на ротационных машинах происходит при прохождении выправляемого материала между вращающимися роликами, расположенными в шахматном порядке. Технология

правки знакопеременным изгибом деталей между роликами создает положительные предпосылки для распространения такого способа правки на тонкостенные диски муфт управления. Исследования в этой области впервые проведены на Уралмашзаводе при создании машины для правки под контролем руководителя проектов по оборудованию В.А. Быкова [14]. Диск, подлежащий правке, деформируют до максимального изгиба при его вращении между роликами, а затем деформацию диска уменьшают до нуля с заданной закономерностью.

Разработка новых способов правки на основе знакопеременного изгиба полотна диска и широкого внедрения нового оборудования для правки проводилась на кафедре обработки металлов давлением БНТУ под руководством академика Академии наук Белоруссии А.В. Степаненко, а также их практическая реализация – в Минском ПКТИ [15]. Автором была предложена схема правки, при которой диск размещался между двумя кассетами – верхней и нижней. Нижняя кассета имела привод вращения диска, а при опускании верхней кассеты до соприкосновения с полотном диска происходило перекрытие верхней и нижней кассет для обеспечения необходимого прогиба полотна диска. Таким образом была реализована существующая схема правки знакопеременным изгибом полос (лент) для правки деталей типа тонкостенных дисков.

Исследование способа правки дисков между роликами проводилось с целью определения необходимой величины прогиба, обеспечивающего оптимальные по значению напряжения упруго-пластического деформирования, их влияния на процесс правки. Важным фактором обеспечения плоскостности дисков является окончание процесса при абсолютно точном взаимном расположении кассет с роликами (верхними и нижними). Необходимо, чтобы образующиеся роликами плоскости соприкосновения с диском были строго параллельны и расстояние между ними по окончании процесса правки было равно толщине самого диска. В случае несоблюдения этого условия диск после правки имел наведенную погрешность по плоскостности. Это позволило сделать вывод об управляемости процессом правки за счет изменения его режимов, необходимости определения его точных параметров (прогиб, скорость вращения, количество роликов, их расположение, циклограмма перемещения роликов и т. п.).

В начале процесса правки, когда прогибы малы и значительно меньше толщины диска, диск испытывает напряжения, возникающие при изгибе. Срединная поверхность полотна, равноотстоящая от поверхностей диска, почти не удлиняется и не испытывает напряжений растяжения-сжатия. При увеличении усилия деформирования прогибы становятся соизмеримы с толщиной диска. Срединная поверхность удлиняется и, помимо напряжений изгиба, появляются мембранные напряжения (напряжения растяжения), соизмеримые с изгибными. При дальнейшем деформировании диска его сопротивление внешней нагрузке возрастает, увеличение прогиба происходит в результате растяжения материала диска. Напряжения достигают напряжений текучести, и их дальнейшее увеличение при правке нецелесообразно. Знакопеременный характер нагружения диска создает условия пластического деформирования при меньшем усилии деформирования и, соответственно, меньших прогибах полотна диска. Это создает предпосылки уменьшения остаточных напряжений после ротационной правки.

Дальнейшие работы в этом направлении, этапы создания серии установок для правки, внедрения их в производство при изготовлении дисков, исследование динамической стабилизации (в том числе при эксплуатации дисков, подверженных ротационной правке знакопеременным изгибом), расчетно-экспериментальное обоснование размеров дисков (ширина кольцевого полотна диска, оптимальная с точки зрения работы муфты управления, а также осуществления процесса правки) реализованы В.Е. Антоном [16]. Номенклатура дисков муфт управления широкая и включает в себя диски диаметром от 45 до 985 мм. В зависимости от диаметра меняется ширина зоны деформации (коэффициент d/D соотношения между внутренним d и наружным D диаметрами диска). Эффективность применения ротационной правки в значительной степени определяется значением этого коэффициента d/D . Для «широких» дисков с соотношением диаметров в пределах 0,65–0,74 и диаметром до 950 мм особо эффективным является способ правки дисков знакопеременным изгибом, так как для таких дисков обеспечить их плоскостность до 0,15–0,5 мм не представляется возможным.

Автором настоящей статьи проведен анализ отечественного и зарубежного опыта ведущих фирм, изготавливаемых дисков муфт управления различного наружного диаметра. В результате анализа установлено, что для дисков диаметром до 80 мм значение коэффициента d/D находится

в пределах 0,62–0,70, для дисков диаметром 80–650 мм – в пределах 0,70–0,75, для дисков диаметром 650–985 мм – в пределах 0,75–0,80. Для обеспечения требуемой плоскостности «широких» дисков рекомендуется их правка давлением знакопеременным изгибом, являющаяся наиболее эффективным способом повышения точности. При этом важно для дисков после правки сохранять размерную стабильность геометрических параметров в условиях их работы с учетом динамической эксплуатации многодисковых муфт управления [17].

3. Правка фрикционных дисков на основе знакопеременного изгиба «бегущей волной деформации». Схема изгиба дисков, краткое описание процесса, результаты исследования

Ведомый диск муфты сцепления имеет стальное полотно, к которому с помощью заклепок прикрепляют ступицу, а по периферии – фрикционные накладки. К диску в области накладок прикладывают сжимающие усилия в направлении, перпендикулярном плоскости накладок. Защемленная таким образом кольцевая поверхность диска выравнивается, в области диска между его ступицей и накладками возникают дополнительные напряжения, которые уменьшаются при знакопеременном изгибе полотна. Обеспечение точности диска происходит за счет деформирования его стального полотна в зоне между ступицей и фрикционными накладками.

Особенность правки тонкостенных деталей заключается в том, чтобы возникающие в диске напряжения не превышали предела текучести при протекании локальных пластических деформаций. При знакопеременном характере нагружения происходит суммирование напряжений правки с напряжениями фиксации диска при зажиме и происходит их уменьшение. После снятия сжимающих усилий диск имеет ровную поверхность, а центральная ось диска О-О перпендикулярна накладкам (рис. 4). Величина торцевого биения уменьшается после правки.

В связи с этим был разработан новый способ правки, одной из основных особенностей которого является возбуждение в стальном полотне диска бегущей волны деформации, при которой возникают знакопеременные затухающие напряжения в полотне диска с одновременным приложением сжимающих усилий к области асбофрикционных накладок [18]. В процессе правки диск находится в зажатом состоянии, характеризующемся точностью по его плоскостности и фиксации ступицы. Подобная схема такого изгиба полотна диска впервые приведена в работе В.П. Тимошенко и С. Войновского-Кригера [19], а схема реализации процесса правки показана на рис. 4.

При правке дисков сцепления очаг деформации состоит из плоских участков и изогнутых частей диска. Плоский участок – это область расположения фрикционных элементов, находящаяся под действием удельного давления P , а криволинейный – зона между ступицей и накладками.

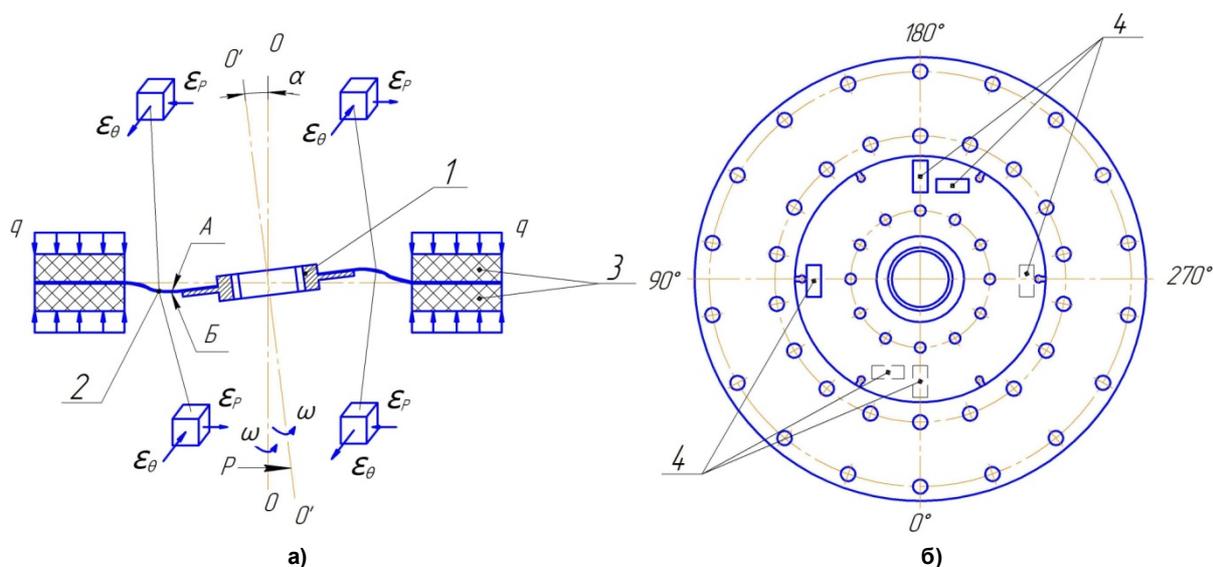


Рис. 4. Схема ротационного способа правки знакопеременным изгибом дисков сцепления (а, б – схемы деформации дисков и расположения тензодатчиков), 1, 2 – ступица и стальное полотно диска (лицевая поверхность – А и тыльная – Б), 3 – асбофрикционные накладки, 4 – тензодатчики, наклеенные для исследования деформаций полотна диска

На практике способ правки дисков может быть реализован двумя путями. Во-первых, за счет вращения области диска, находящегося под действием сжимающих усилий с угловой скоростью ω . Данная схема реализуется при одновременном отклонении оси ступицы $O'-O'$ относительно центральной оси диска $O-O$ на угол α под действием усилия P в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения диска. Во-вторых, при перемещении оси ступицы $O'-O'$ с той же угловой скоростью ω по заданной в процессе нагружения траектории. При этом происходит уменьшение угла отклонения между осями за счет усилия деформации, прикладываемого в плоскости, параллельной плоскости вращения диска на расстоянии, равном плечу расположения деформационной силы P .

Под действием момента от деформационной силы P поверхность диска изгибается и слои его полотна в очаге деформации испытывают напряжения сжатия и растяжения, которые вызывают их деформации как в радиальном ε_r , так и в тангенциальном ε_θ направлениях. При этом в диске возникают две диаметрально расположенные области, характеризующиеся наличием максимальных по величине, но противоположных по знаку деформаций в направлении действия силы P и минимальных деформаций (близких к нулю) в направлении, перпендикулярном вектору этой силы. При правке в области фрикционных накладок прикладывается равномерно по всей поверхности накладок удельное давление q . Противоположные поверхности сторон диска находятся под действием разноименных напряжений и в радиальном σ_r (рис. 5 а), и в тангенциальном направлениях σ_θ (рис. 5 б).

Процесс правки происходит при круговой трансляции этих зон с одновременным снижением по абсолютной величине напряжений за счет уменьшения угла отклонения оси ступицы ($O'-O'$) от центральной оси диска ($O-O$). По окончании правки ось ступицы ($O'-O'$) совмещается с центральной осью диска ($O-O$), которая в этом положении перпендикулярна плоскости асбофрикционных дисков в зажатом состоянии.

В полотне диска при правке возникают напряжения в радиальном направлении σ_r , достигающие предела текучести вблизи ступицы. Тангенциальные напряжения σ_θ уменьшаются без изменения знака. Исследования мембранных напряжений показали, что при выбранных оптимальных режимах отклонения оси ступицы они незначительны, что обуславливает высокое качество выправляемых дисков. Появление мембранных напряжений в срединной поверхности полотна диска было зафиксировано за счет разности величин растягивающих и сжимающих напряжений при знакопеременном изгибе. Это позволило установить такой режим правки, при котором напряжения сжатия и растяжения близки по своей величине.

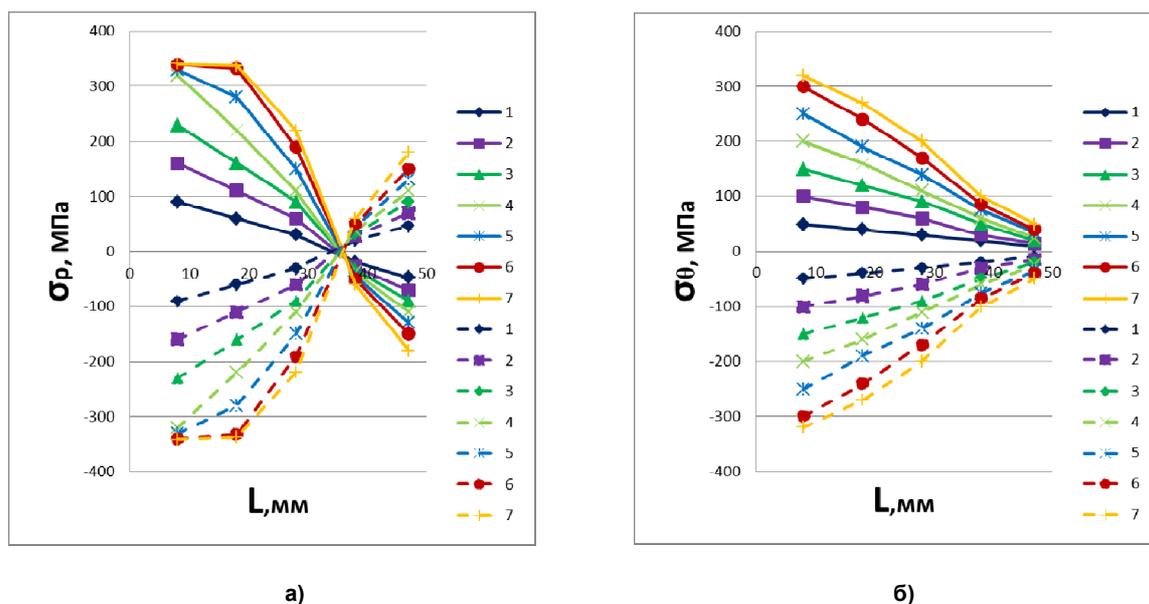


Рис. 5. Зависимость радиальных σ_r (а) и тангенциальных напряжений σ_θ (б) от амплитуды циклограммы нагружения 1–2 мм; 2–3 мм; 3–4 мм; 4–5 мм; 5–6 мм; 6–7 мм; 7–8 мм на расстоянии L от края ступицы для лицевой (-----) и тыльной (- - - - -) поверхностей диска

На рис. 6 показана осциллограмма изменения деформации полотна диска в процессе его правки, иллюстрирующая синусоидальный характер деформаций. В начальный период правка диска производится при максимальном угле отклонения 3° . При уменьшении угла отклонения амплитуда деформации уменьшается.

При пластическом деформировании стального полотна уменьшается неплоскостность диска, а также фиксируется положение ступицы относительно плоскости фрикционных накладок. При завершении правки происходит упругое деформирование полотна. Это характерно как при правке дисков муфт управления знакопеременным изгибом между коническими роликами, так и при ротационной правке знакопеременным изгибом дисков муфт сцепления. Это утверждение является закономерностью правки знакопеременным изгибом по циклограмме нагружения с уменьшением прогиба полотна диска по окончании процесса, как и то, что вследствие локального изгиба полотна во всех случаях имеет место одновременно как пластическое деформирование, так и упругая деформация в стальном полотне диска.

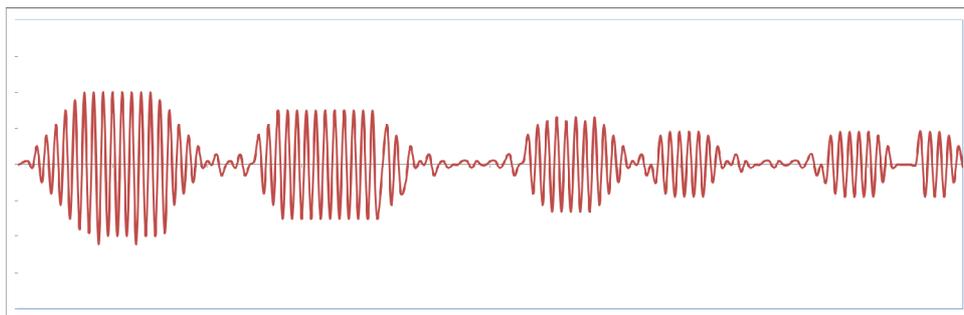


Рис. 6. Типовая осциллограмма изменения величины деформаций в диске в процессе его ротационной правки знакопеременным изгибом стального полотна

Выполненные исследования положены в основу изготовления промышленных установок для правки дисков сцепления.

С целью автоматизации процесса правки установка снабжена манипулятором для подачи диска в зону правки и удаления диска после окончания правки. Производительность установки – 45 шт./час, емкость кассеты – 33 шт. Время выработки кассеты – 44 мин. Усилие зажима диска по накладкам – 200 кН, габаритные размеры установки – 1920 × 1220 × 1860 мм. Диски после правки имеют неплоскостность до 0,5 мм и биение до 0,8 мм.

Проведенные исследования позволили установить общие закономерности для правки деталей типа дисков, разработать ряд автономных установок для их правки, нашедших широкое применение в процессе изготовления деталей (рис. 7).



Рис. 7. Автоматическая установка для ротационной правки знакопеременным изгибом дисков сцепления

Выводы

Рассмотренные технологии динамической правки позволяют изготавливать фрикционные диски с минимальным уровнем брака при производстве – на уровне до 5 %. Для этого создано оборудование и инженерные методики расчетов режимных параметров правки в зависимости от «исправляемости» изделий.

В дальнейшем исследователям и инженерам в области правки необходимо прорабатывать вопрос уменьшения времени воздействия циклической нагрузки и уравнивания пластической деформации полотна диска в радиальном и тангенциальном направлениях в процессе правки. Это необходимо не только для ускорения процесса правки, но и для того, чтобы не создавать остаточных деформаций дисков. Технология правки должна способствовать релаксации остаточных напряжений в диске за счет приложения сбалансированной комбинации внешних напряжений, создаваемой циклической и статической нагрузками. Учет и правильный выбор нужного сочетания разного вида внешних напряжений, создающих деформации диска в процессе правки, очень важны. Здесь имеются ввиду не только деформации изгиба, но и деформации кручения и сдвига в тангенциальном направлении. При оптимальном сочетании возможно получить уравнивание деформаций полотна диска в обоих направлениях. Это должно отразиться благоприятным образом и на стабилизации геометрических параметров при их эксплуатации.

Литература

1. *Experimental measurement of residual stress and distortion in additively manufactured stainless steel components with various dimensions* / M. Ghasri-Khouzani, H. Pengb, R. Roggec et al. // *Materials Science & Engineering: A*. – 2017 – Vol. 707. – P. 689–700.

2. Świć, A. *Method of achieving accuracy of thermo-mechanical treatment of low-rigidity shafts* / A. Świć, A. Draczew, A. Gola // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2016. – № 10 (29). – P. 62–70.

3. Świć, A. *Analysis of typical structures of dynamic systems of machining of elastic-deformable shafts with low rigidity* / A. Świć, A. Gola, D. Wołos // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2018. – № 3 (12). – P. 1–9.

4. Тараторкин, А.И. *Снижение динамической нагруженности фрикционных элементов управления трансмиссией транспортных машин методом исключения параметрических колебаний: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03* / А.И. Тараторкин. – М., 2015. – 16 с.

5. Антонюк, В.Е. *Особенности конструкции и технологии изготовления фрикционных дисков гусеничных и колесных машин* / В.Е. Антонюк // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2016. – № 3 (36). – С. 43–52.

6. Гупалов, Б.А. *Разработка технологии вибрационной правки мало жестких деталей типа дисков: автореф. дис. ... канд. техн. наук.: 05.02.08* / Б.А. Гупалов. – Челябинск, 2013. – 19 с.

7. Пат. 2484910 Российская Федерация. *Способ вибрационной правки не жестких деталей* / Ю.Г. Бучнев, Б.А. Гупалов, В.В. Закураев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО НИЯУ «МИФИ». – № 2010145692/02; заявл. 09.11. 2010; опублик. 20.06.2013, Бюл. № 17. – 8 с.

8. Vardanjani, M.J. *Analysis of the vibrational stress relief for reducing the residual stresses caused by machining* / M.J. Vardanjani, M. Ghayour, R.M. Homami // *Experimental Techniques*. – 2016. – № 40(2). – P. 705–713.

9. Пат. 2612463 Российская Федерация. *Способ вибрационной правки деформированных металлических конструкций* / А.А. Васильев, Р.П. Животовский и др.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Центр технологии судостроения и судоремонта». – № 2015124622, 23.06.2015; опублик. 09.03.2017, Бюл. № 7. – 7 с.

10. Coules, H.E. *Characterising the effects of high-pressure rolling on residual stress in structural steel welds* / H.E. Coules – Cranfield University, 2012 – 194 p.

11. Farajian, M. *Stability and relaxation of welding residual stresses* / M. Farajian, T. Nitschke-Pagel, K. Dilger // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 681. – P. 55–60.

12. *On the mechanism of residual stresses relaxation in welded joints under cyclic loading* / Q. Wang, X. Liu, Z. Yan et al. // *International Journal of Fatigue*. – 2017. – № 105. – P. 43–59.

13. Jaroszewicz, J. Design of the vibrostabilisation stand for reducing residual stresses in discs used in the construction of multi-plate clutches and brakes / J. Jaroszewicz, K. Lukaszewicz, V. Antonyuk // *Acta Mechanica et Automatica*. – 2019. – № 1 (13). – P. 37–44.

14. А.с. 423541 СССР. Машина для правки изделий из листа / В.А. Быков, Ю.П. Дыдыкин, К.В. Коряков, Ю.А. Стриженов, Ю.А. Чертков. – № 1809556/25-27; заявл. 11.07.1972; опубли. 15.04.1974, Бюл. № 14.

15. Петренко, В.Ш. Разработка и внедрение способа ротационной правки деталей типа дисков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.16.05, 05.02.08 / В.Ш. Петренко. – Минск: БПИ, 1985. – 16 с.

16. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В.Е. Антонюк. – Минск: Беларуская наука, 2017. – 190 с.

17. Wohlleber, F.A.G. Thermischer. Haushalt nasslaufender Lamellenkupplungen: diss. ...Dr. Ing / F.A.G. Wohlleber. – München: Technischen Universität München, 2012 – 146 с.

18. Степаненко, А.В. Особенности процесса ротационной правки деталей типа дисков / А.В. Степаненко, И.Г. Добровольский, В.Ш. Петренко // *Известия АН БССР. Серия физ.-техн. наук*. – 1982. – № 3 – С. 42–44.

19. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер – М.: Изд-во «Наука», 1966. – 636 с.

Гупалов Борис Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Общепрофессиональные дисциплины», Новоуральский технологический институт НИЯУ «МИФИ», г. Новоуральск, gupalov_b@mail.ru.

Закураев Виктор Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Новоуральский технологический институт НИЯУ «МИФИ», г. Новоуральск, tm@ntsi.ru.

Петренко Валерий Шаевич, кандидат технических наук, главный технолог, заведующий конструкторско-технологическим отделом, Государственное специальное конструкторское технологическое бюро по механизации, г. Киев, Украина, pvaler@mail.ru.

Поступила в редакцию 4 июня 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200306

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING FRICTION DISCS BASED ON VIBRATION LOADING AND ALTERNATING BENDING

B.A. Gupalov¹, gupalov_b@mail.ru,

V.V. Zakuraev¹, tm@ntsi.ru,

V.Sh. Petrenko², pvaler@mail.ru

¹ Novouralsk Institute of Technology, MEPhI, Novouralsk, Russian Federation,

² Technology Department of GSKTB for mechanization, Kiev, Ukraine

Particularly rigid parts are those in which one of the geometric parameters is much larger than all the others. The paper discusses various technologies and equipment for editing such rigid parts as friction discs. The outer diameter of the discs is tens or even hundreds of times larger than their thickness. Such design features create difficulties in their manufacture. The task of giving the correct shape to the part is more complicated than observing dimensional tolerances. Therefore, it is important for modern production to have technologies and equipment that would make it possible to shape the part and hold it for a long time. According to the authors of this work, this can be achieved solely by progressive editing.

A distinctive feature of modern dressing technologies for non-rigid products is the creation of dynamic effects on their work surfaces. In the process of dressing, various types of microplastic deformations, including bending, are created on their working surfaces. The cyclic nature of the editing of parts creates conditions for the relaxation of residual stresses in the material of products, which favorably affects the stabilization of their geometric parameters over time. At the same time, during dynamic dressing of products in certain modes, there is no loss in the operational resource of the products. On the contrary, the correct shape of the products creates the conditions for increasing the durability of low-rigid products.

An attempt is made to summarize information on the technology of editing friction discs based on studies performed by the authors of this work in different years. The article reveals the ways to improve the editing technology, in order to give the products the correct geometric shape.

Keywords: friction discs, disc editing technology, low-weight parts, stress relaxation, dynamic stabilization of geometric parameters, vibration adjustment of parts, alternating loading, editing modes.

References

1. Ghasri-Khouzani M., Pengb H., Roggec R., Attardod R., Ostiguyd P., Neidige J., Billof R., Hoelzleg D., Shankara M.R. Experimental Measurement of Residual Stress and Distortion in Additively Manufactured Stainless Steel Components with Various Dimensions. *Materials Science & Engineering: A*, 2017, vol. 707, pp. 689–700.
2. Świć A., Draczew A., Gola A. Method of Achieving Accuracy of Thermo-Mechanical Treatment of Low-Rigidity Shafts. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016. No 10 (29), pp. 62–70.
3. Świć A., Gola A., Wołos D. Analysis of Typical Structures of Dynamic Systems of Machining of Elastic-Deformable Shafts with Low Rigidity. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2018, no. 3 (12), pp. 1–9.
4. Taratorkin, A.I. *Snizheniye dinamicheskoy nagruzhennosti friktsionnykh elementov upravleniya transmissiyey transportnykh mashin metodom isklyucheniya parametricheskikh kolebaniy: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Reducing the Dynamic Loading of Friction Controls for the Transmission of Transport Vehicles by Excluding Parametric Oscillations: dis. ... kand. techn. sciences]. *Moscow: Moscow State Technical University N.E. Bauman*, 2015. 16 p.
5. Antonyuk, V.E. Features of the design and manufacturing technology of friction discs for tracked and wheeled vehicles. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2016, no. 3(36), pp. 43–52.
6. Gupalov B. *Razrabotka tekhnologii vibratsionnoy pravki malozhestkikh detaley tipa diskov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of Technology for Vibration Editing of Low-Rigid Parts of the Disk Type: dis. ... kand. techn. sciences]. *Novoural'sk: NTI NRNU "MIPhI"*, 2013, 19 p.
7. Buchnev Yu., Gupalov B., Zakuraev V. *Sposob Vibratsionnoy Pravki Nezhestkikh Detaley* [Method of Vibration Editing of Non-Rigid Parts]. Patent 2484910 RF, 2013, no. 17.
8. Vardanjani M.J., Ghayour M., Homami R.M. Analysis of the Vibrational Stress Relief for Reducing the Residual Stresses Caused by Machining. *Experimental Techniques*. 2016. No. 40(2), pp. 705–713.
9. Vasiliev A.A., Zhivotovsky R.P., etc. *Sposob Vibratsionnoy Pravki Deformirovannykh Metallicheskikh Konstruktsiy* [Method of Vibration Correction of Deformed Metal Structures] Patent 2612463 RF. 2017.
10. Coules H.E. Characterising the effects of high-pressure rolling on residual stress in structural steel welds. *Cranfield University*, 2012, 194 p.
11. Farajian M., Nitschke-Pagel T., Dilger K. Stability and relaxation of welding residual stresses. *Materials Science Forum*, 2011, vol. 681, pp. 55–60.
12. Wang Q., Liu X., Yan Z., Dong Z., Yan D. On the mechanism of residual stresses relaxation in welded joints under cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 2017, no. 105, pp. 43–59.
13. Jaroszewicz J., Lukaszewicz K., Antonyuk V. Design of the vibrostabilisation stand for reducing residual stresses in discs used in the construction of multi-plate clutches and brakes. *Acta Mechanica et Automatica*, 2019. No. 1 (13), pp. 37–44.

14. Bykov V.A., Dydykin Yu.P., Koryak K.V., Strizhenov Y.A., Chertkov Yu.A. *Mashina dlya Pravki Izdeliy iz Lista* [Machine for straightening products of sheet] Patent. 423541 USSR, 1974.

15. Petrenko, V. *Razrabotka i Vnedreniye Sposoba Rotatsionnoy Pravki Detaley Tipa Diskov* [Development and implementation of a method for rotary editing of disk-type parts: abstr. dis. ... kand. techn. sciences]. *Minsk: the Institute*, 1985, 16 p.

16. Antonyuk V.E. *Dinamicheskaya Stabilizatsiya v Proizvodstve Malozhestkikh Detaley* [Dynamic Stabilization in the Production of Low-Rigid Parts] *Minsk: Belarusian Nauka*, 2017. 190 p.

17. Florian Georg Andreas Wohlleber. *Thermischer Haushalt nasslaufender Lamellenkupplungen*: diss. ... dr.ing. *München: Technischen Universität München*, 2012. 146 p.

18. Stepanenko A.V., Dobrovolsky I.G. Petrenko V.Sh. [Features of the Process of Rotary Editing of Disk-Type Parts]. *Izvestiya an BSSR. Phys.-tech series. sciences'*. 1982. No. 3, pp. 42–44.

19. Timoshenko S. P., Voynovsky-Krieger S. Plates and shells. Per. from the English. *Moscow: Nauka Publishing House*, 1966. 636 p.

Received 4 June 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гупалов, Б.А. К вопросу совершенствования технологии изготовления фрикционных дисков на основе вибрационного нагружения и знакопеременного изгиба / Б.А. Гупалов, В.В. Закураев, В.Ш. Петренко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 59–71. DOI: 10.14529/engin200306

FOR CITATION

Gupalov B.A., Zakuraev V.V., Petrenko V.Sh. Improving the Technology of Manufacturing Friction Discs Based on Vibration Loading and Alternating Bending. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 59–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200306
