

УДК 539.43: 621.982

В. Е. АНТОНЮК, доктор технических наук, Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ И ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ

Приведены результаты использования динамической стабилизации при изготовлении фрикционных дисков многодисковых маслоохлаждаемых тормозов, используемых в карьерных самосвалах семейства БелАЗ. Исследовано состояние остаточных напряжений в дисках при их изготовлении по действующему технологическому процессу и процессу с использованием динамической стабилизации. Отмечена необходимость разработки производственного неразрушающего метода контроля остаточных напряжений, и приведены результаты предварительных исследований по измерению распределения градиента поля от остаточной намагниченности для неразрушающего контроля остаточных напряжений в деталях типа дисков.

Введение. При обработке нежестких деталей типа дисков, торсионных и коленчатых валов, тонкостенных гильз и цилиндров, бурильных труб и лопаток турбин существует проблема, связанная с возникновением технологических остаточных напряжений, что приводит к существенным изменениям геометрической формы изготовленных деталей [1–3].

Для исключения этих явлений применяются различные технологические правки, которые в большинстве случаев основаны на нагружении детали статической нагрузкой. Однако эти правки не уменьшают остаточных напряжений и поэтому не могут обеспечить сохранение стабильной геометрической формы детали на протяжении длительного времени не только в процессе эксплуатации, но и при обычном хранении.

Известные методы снижения остаточных напряжений путем термической, термомеханической, термоциклической обработки хорошо устраняют остаточные напряжения, но приводят к разупрочнению материала и снижению сопротивления микропластическим деформациям, поэтому методы термической обработки не решают полностью проблему снятия остаточных напряжений и стабилизации геометрических параметров.

Для снижения остаточных напряжений при обработке нежестких деталей в последнее время широко применяется математическое моделирование технологических процессов изготовления таких деталей, однако использование этого метода для конкретных деталей ограничено [4].

Более дешевым и универсальным путем повышения точности и снижения остаточных напряжений при изготовлении нежестких изделий является использование циклического нагружения.

Научные основы и физические закономерности динамической стабилизации геометрических параметров деталей на основе циклического знакопеременного нагружения с изменяющейся амплитудой в зоне, близкой к пределу текучести материала, были разработаны в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси. Динамическая стабилизация при изготовлении дисков сцепления и фрикционных дисков позволила достичь показателей по геометрической точности, которые невозможно было обеспечить с помощью других методов изготовления. Помимо существенного повышения геометрической точности деталей при динамической стабилизации было отмечено и снижение остаточных напряжений.

Несмотря на большой объем выполненных исследований по измерению остаточных напряжений и наличие различных методов, выбор метода для применения в производственных условиях остается достаточно сложной задачей.

В связи с этим, одной из задач при динамической стабилизации нежестких деталей является разработка метода неразрушающего контроля остаточных напряжений.

Динамическая стабилизация и остаточные напряжения. В качестве физической основы динамической стабилизации используется явление гистерезиса в области упругопластического деформирования, а для теоретического описания процесса динамической стабилизации применены базовые уравнения кривой петли гистерезиса. Стабилизация механических свойств материалов и снижение остаточных напряжений при циклическом знакопеременном нагружении в зоне упругопластических деформаций достаточно управляемы при целенаправленном воздействии на динамику изменения ширины петли гистерезиса. Основные положения динамической стабилизации достаточно подробно приведены в работах [5, 6].

В настоящее время создано оборудование с ЧПУ и разработано технологическое программное обеспечение для динамической стабилизации деталей типа дисков.

С учетом требований к фрикционным дискам многодисковых маслоохлаждаемых тормозов (ММОТ), используемых в карьерных самосвалах семейства БелАЗ, разработана универсальная установка с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков с размерами наружного диаметра от 580 до 915 мм.

Диски с диаметрами до 950 мм ранее не применялись в отечественном машиностроении и впервые были использованы в ММОТ карьерных самосвалов. В отечественном машиностроении не было опыта изготовления дисков с диаметрами до 950 мм. Анализ зарубежных технологий изготовления дисков показал, что на таких зарубежных специализированных фирмах, как MiBa и Hoerbiger изготавливались диски с диаметрами не более 600 мм при достигаемой точности по отклонению от плоскостности 0,4 мм.

Диски ММОТ работают в режиме длительного нагружения во время движения карьерного самосвала на спуске с большим выделением тепла. Поэтому одним из основных условий обеспечения работоспособности ММОТ является необходимость установить отклонение

от плоскостности рабочих поверхностей дисков в пределах 0,30 мм и сохранить эту точность во время эксплуатации.

Традиционные технологические процессы изготовления дисков включают операции вырезки кольцевых заготовок, правку, закалку с высоким отпуском, черновое шлифование рабочих поверхностей, нарезание зубчатых венцов, термофиксацию (отпуск) с охлаждением в пакете, чистовое шлифование, правку. Несмотря на довольно сложный технологический процесс, требуемая точность изготовления по отклонению от плоскостности рабочих поверхностей для всех дисков не обеспечивается, и для исправления повышенного отклонения от плоскостности для части дисков применяется ручная правка.

Однако по этой технологии было невозможно достичь точности по отклонению от плоскостности не более 0,3 мм. Для оценки фактической точности изготовления дисков по действующему технологическому процессу были проведены измерения отклонения от плоскостности на дисках ММОТ, используемых в карьерных самосвалах грузоподъемностью 65 тонн. На рисунках 1 и 2 представлена динамика изменения точности на основных технологических операциях изготовления дисков по отклонению от плоскостности. На этих графиках прослеживается возникновение повышенных отклонений на всех операциях технологического процесса изготовления дисков.

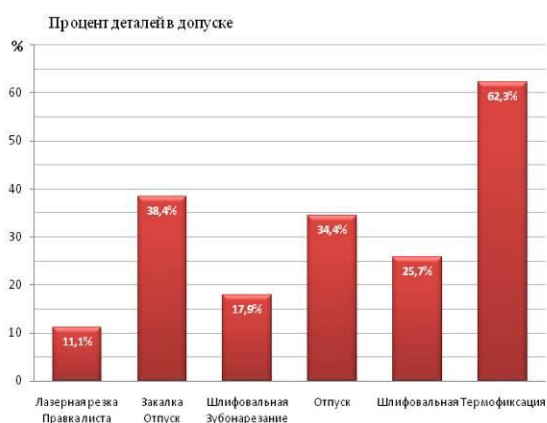


Рисунок 1 – Достижимая точность изготовления дисков с наружным зубчатым венцом диаметром 588 мм, внутренним диаметром 420 мм по действующему технологическому процессу

Для проверки наличия остаточных напряжений в дисках при изготовлении по действующей технологии были проведены исследования на дисках с наружным зубчатым венцом диаметром 588 мм и внутренними диаметром 420 мм. Была отобрана партия дисков в количестве 132 штук с отклонением от плоскостности в пределах 0,20–0,35 мм и отправлена на хранение в течение четырех месяцев, после чего отклонение от плоскостности стало в пределах 0,20–1,20 мм. Результаты обмеров и статистической обработки приведены в таблице 1.

Приведенные данные являются подтверждением возникновения остаточных напряжений и невозможности достижения заданной точности по отклонению от плоскостности не более 0,3 мм при действующей технологии изготовления дисков.

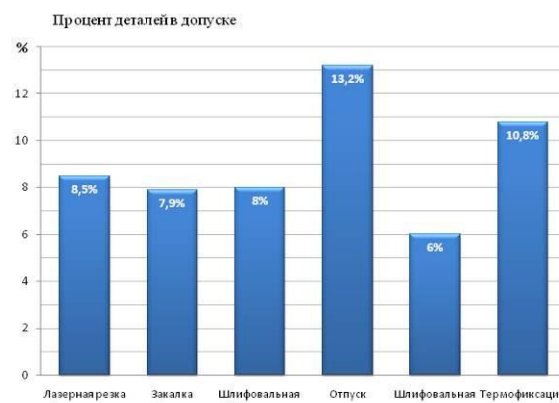


Рисунок 2 – Достижимая точность изготовления дисков с наружным диаметром 585 мм, внутренним зубчатым венцом диаметром 414 мм по действующему технологическому процессу

Таблица 1 – Изменение точности дисков с наружным зубчатым венцом диаметром 588 мм и внутренними диаметром 420 мм

Состояние	Процент деталей в допуске 0,3 мм, %	Фактический интервал, мм	Центр рассеивания X_0 , мм	Среднее квадратическое отклонение σ , мм
После изготовления по действующей технологии	58,7	0,20–0,35	0,289	0,048
После хранения в течение 4 месяцев	16,6	0,20–1,20	0,498	0,212

В связи с такими выводами было принято решение о необходимости разработки новой технологии изготовления дисков на основе концепции использования динамической стабилизации на тех стадиях технологического процесса, где возникают остаточные напряжения, – после вырезки заготовок из листа, после предварительного и после окончательного шлифования.

В результате внедрения динамической стабилизации для всех типоразмеров фрикционных дисков ММОТ карьерных самосвалов семейства БелАЗ было достигнуто отклонение от плоскостности не более 0,3 мм. Требуемое отклонение от плоскостности достигалось при различных режимах динамической стабилизации, в связи с этим при выборе режимов динамической стабилизации требовалась оперативная оценка остаточных напряжений при неразрушающем контроле дисков. Наиболее приемлемым на этом этапе исследований оставался метод оценки остаточных напряжений в дисках путем оценки их деформируемости в процессе хранения. В таблице 2 приведены результаты изменения точности дисков с наружным зубчатым венцом диаметром 588 мм и внутренними диаметром 420 мм, изготовленных с использованием динамической стабилизации. Замеры проводились в фиксированных точках в шести равномерно расположенных сечениях диска на наружном и внутреннем диаметрах. Повторно аналогичные замеры были проведены спустя 60 дней при хранении этих дисков в свободном положении.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о незначительном уровне увеличения отклонения от плоскостности и, следовательно, о незначительном

уровне остаточных напряжений в дисках после динамической стабилизации.

Таблица 2 – Изменение точности дисков с наружным зубчатым венцом диаметром 588 мм и внутренним диаметром 420 мм при изготовлении с использованием динамической стабилизации

Состояние	Процент деталей в допуске 0,3 мм, %	Фактический интервал, мм	Центр рассеивания X_0 , мм	Среднее квадратическое отклонение σ , мм
После изготовления с использованием динамической стабилизации	100,0	0,05–0,30	0,237	0,081
После хранения в течение 60 дней	98,3	0,05–0,32	0,248	0,083

Для оценки остаточных напряжений были использованы более оперативные методы: рентгеновский, тензометрический, магнитошумовой Браугузена и оценка распределения магнитных свойств. Первые три метода являются лабораторными и не могут быть использованы для производственного контроля. Способ исследования, основанный на анализе распределения магнитных свойств, был применен при исследовании фрикционных дисков с различными технологическими вариантами их изготовления.

Для исследования магнитных свойств дисков использован специальный прибор «Сортировщик магнитный МС-1» [7]. Прибор намагничивает локальный участок изделия полюсом постоянного магнита и измеряет градиент от остаточной намагниченности над местом контакта диска с полюсом постоянного магнита. Напряженность магнитного поля на торце датчика в режиме намагничивания была не менее 40 кА/м.

В качестве объекта исследования были взяты диски ММОТ, изготавливаемые из горячекатаной стали 65Г и из холоднокатаной стали С67S с наружными диаметрами 490, 585 и 885 мм.

Измерение градиента поля от остаточной намагниченности проводилось на среднем радиусе по ширине рабочей поверхности диска два раза. Перед повторным измерением диск размагничивался. Третье измерение распределения магнитных свойств в диске проведено через 3 месяца. На рисунке 3 представлено изменение значений градиента поля от остаточной намагниченности по окружности диска из горячекатаной стали 65Г с наружным диаметром 490 мм.

Полученные результаты по измерению распределения градиента поля от остаточной намагниченности для исследуемых дисков показало значительную разницу в магнитных свойствах по окружности для исследованных дисков, что предполагает наличие остаточных напряжений.

Получено 11.05.2016

V. E. Antonyuk. Dynamic stability and residual stress parts manufacturing nonrigidity.

Results of use of dynamic stabilisation are resulted at manufacturing of frictional disks multidisk маслоохлаждаемых the brakes used in career dump-body trucks of family BelAZ. The condition of residual pressure in disks is investigated at their manufacturing on operating technological process 3 and process with use of dynamic stabilisation. Necessity of working out of an industrial not destroying quality monitoring of residual pressure is noted and results of preliminary researches on measurement of distribution of a gradient of a field from residual magnetisation for not destroying control of residual pressure in details of type of disks are result.

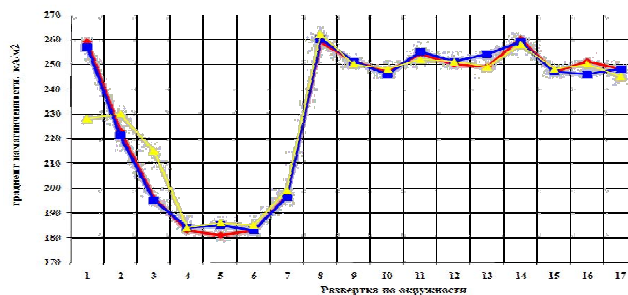


Рисунок 3 – Изменение значений градиента поля от остаточной намагниченности по окружности диска из горячекатаной стали 65Г с наружным диаметром 490 мм

Закключение. Динамическая стабилизация имеет ряд преимуществ по сравнению со статическими, термическими и термомеханическими методами правки деталей и позволяет эффективно повышать геометрическую точность нежестких деталей с одновременным снижением остаточных напряжений.

Результаты по снижению остаточных напряжений при динамической стабилизации были получены путем измерения деформаций дисков в процессе длительного хранения, что затрудняет оперативную оценку снижения остаточных напряжений.

Проведенные предварительные исследования по измерению распределения градиента поля от остаточной намагниченности позволяют прогнозировать его применение для неразрушающего контроля остаточных напряжений в деталях типа дисков.

Список литературы

- 1 Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей. – М.: Машиностроение, 1973. – 180 с.
- 2 Вишняков, Я. Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я. Д. Вишняков, В. Д. Пискарев. – М.: Металлургия, 1989. – 252 с.
- 3 Овсенко, Е. С. Обеспечение качества изготовления маложестких деталей типа дисков газотурбинных установок за счет снижения технологических остаточных деформаций : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Е. С. Овсенко. – М., 2011. – 144 л.
- 4 Барахтенко, Е. А. Минимизация поводок тонкостенных авиационных деталей на основе дискретного моделирования : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Е. А. Барахтенко. – Иркутск, 2010. – 178 л.
- 5 Антонюк, В. Е. Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей знакопеременным нагружением / В. Е. Антонюк. – Минск : УП «Технопринт». – 2004. – 184 с.
- 6 Антонюк, В. Е. Основные положения динамической стабилизации геометрических форм деталей / В.Е. Антонюк, О.В. Берестнев // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2005. – Т. 49. – № 3. – С. 98–102.
- 7 Сандомирский, С. Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия. – 2006. – № 9. – С. 36–64.