

па оборудования, на котором будет производиться черновая обработка заготовки, максимально возможная глубина резания (черновой припуск или напуск), материал режущей части инструмента, стойкость инструмента. Программа представляет собой рабочую книгу Microsoft Excel, хранящуюся в файле RVZ.xlsm. Программа имеет пять баз данных, каждая из которых оформлена на отдельном листе рабочей книги Excel и относится к определенному виду обработки: точение, растачивание, фрезерование, сверление, зенкерование.

Таким образом, разработанная методика позволяет выполнять обоснованный выбор заготовок на ранней стадии проектирования техпроцессов механической обработки деталей, повысить объективность принимаемых технологических решений и тем самым сократить затраты на технологическую подготовку производства. Компьютерная программа, разработанная на базе MS Excel, облегчает использования данной методики на практике. Методика может быть полезна инженерам-технологам, занимающимся проектированием техпроцессов изготовления деталей машин.

Список литературы

1. Л.И. Гамрат-Курек Экономика инженерных решений в машиностроении. М: Машиностроение, 1986 г. 255 с.
2. Бабук В. В., Шкред В. А., Медведев А. И. Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении: Учеб. пособ. под ред. Бабука В. В. – Мн. - Выш. шк., 1987. 255 с.: ил.
3. Проектирование технологических процессов в машиностроении / И. П. Филонов, Г. Я. Беляев, Л. М. Кожуро и др. Минск: УП Технопринт, 2003. 910 с.
4. Справочник технолога - машиностроителя: В 2т. Т2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, - 5-е изд. перераб. и доп.- М.: Машиностроение-1, 2001. - 944 с.

УДК 621.833

О.А. Медведев, Ю.А. Дакало, В.Ф. Григорьев
Брестский государственный
технический университет, Беларусь

ЭКОНОМИЧНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЁС

Представлены результаты исследований по снижению трудоёмкости изготовления синхронизирующих зубчатых колёс роторных насосов путём переноса отделочной обработки эвольвентных поверхностей зубь-

ев на этап приработки. Комплекс технологических мероприятий, включающих замену зубошлифования зубофрезерованием высокоточной червячной фрезой, замену термической операции закалки улучшением, уменьшение числа слесарных, контрольных и других операций позволил снизить трудоёмкость изготовления колёс на 31% без существенного снижения их эксплуатационных свойств.

Основной задачей машиностроительного производства является изготовление качественных изделий с наименьшей трудоёмкостью и себестоимостью.

Значительную долю в трудоёмкости изготовления машин составляет трудоёмкость изготовления зубчатых колёс. Одним из методов отделочной обработки эвольвентных поверхностей зубьев зубчатых колёс является зубошлифование. Данный метод является распространенным и точным способом отделки зубчатых колес, обеспечивающим надежные результаты и позволяющим получать требуемое качество поверхности, в первую очередь шероховатость. Обычно шлифованию подвергаются зубья ответственных цементированных и закаленных колес. Однако данный метод обработки является трудоёмким и дорогостоящим способом обеспечения шероховатости и других показателей качества поверхности, определяющих её ресурс.

Для повышения долговечности пар трения обычно стараются уменьшить их приработку в процессе эксплуатации, добиваясь финишной обработкой близкой к оптимальной равновесной шероховатости. Заслуживает внимания и более экономичный подход, связанный с переносом финишных операций на этап приработки деталей [1].

Такой подход позволяет в обоснованных случаях исключить из технологического процесса дорогостоящие отделочные операции, повысить производительность и снизить затраты на изготовление машин.

В качестве одного из вариантов совершенствования технологии изготовления эвольвентных зубчатых колёс была предложена замена отделочной операции зубошлифования последующей приработкой в процессе эксплуатации для достижения требуемой шероховатости. Целью исследования было установление возможности такой замены при изготовлении синхронизирующих зубчатых колёс роторных насосов серий НМ, НР, ВЗ-ОР2-А-2 для снижения трудоёмкости.

Согласно ГОСТ 27674-88 под приработкой понимается процесс изменения геометрии поверхностей трения и физико-химических свойств поверхностных слоёв материала в начальный период трения, обычно проявляющийся при постоянных внешних условиях в уменьшении силы трения, температуры и интенсивности изнашивания. Процесс приработки сопряженных поверхностей сопровождается сложными необратимыми явлениями, протекающими в тонком поверхностном слое.

При трении в начальный период приработки участвует очень большое количество контактирующих между собой выступов, вследствие чего истинные напряжения на образовавшихся площадках могут быть велики, поэтому происходит интенсивное разрушение неровностей, полученных при механической обработке, их дробление и пластическое деформирование, сопровождаемое наклёпом поверхностного слоя.

В результате приработки происходит сглаживание наиболее выступающих неровностей, частичное или полное уничтожение первоначальных и установление новых, отличных от первоначальных по форме и размерам.

При граничном трении поверхностей с относительно высокими неровностями вследствие разрыва масляной плёнки имеет место металлический контакт по выступам данных поверхностей. Интенсивное деформирование и смятие вершин отдельных выступов происходит в начале работы двух трущихся поверхностей, пока они не приработаются, т.е. неровности этих поверхностей не примут более устойчивой формы и размеров. При приработке выступы приобретут оптимальную кривизну, обеспечивающую наибольшую устойчивость масляной плёнки.

Под оптимальной эксплуатационной шероховатостью понимается воспроизводимая в стационарных условиях шероховатость, которой соответствует наименьшая интенсивность изнашивания. Определение «равновесная» шероховатость предлагается понимать как шероховатость, устанавливающуюся на фрикционном контакте при неизменном режиме трения после завершения процесса приработки.

Одной из важных закономерностей приработки является независимость равновесной шероховатости от исходной [2]. Имеются экспериментальные подтверждения того факта, что по окончании приработки устанавливается шероховатость, не зависящая от величины и характера первоначальной шероховатости, полученной при механической обработке, а зависящая от условий изнашивания. Данная шероховатость является оптимальной для данных условий трения и обеспечивает минимальное изнашивание. Она может быть как больше, так и меньше исходной. В период стационарного изнашивания, протекающего после приработки, эта шероховатость воспроизводится на всём последующем процессе нормальной работы трущегося сопряжения.

На рис. 1 приведён график изменения параметра шероховатости R_a во времени при приработке, из которого следует, что при выбранных условиях работы, любая шероховатость приходит к равновесной R_a пр. [3].

В период стационарного изнашивания равновесная шероховатость воспроизводится на всём последующем процессе нормальной работы пары трения. Однако чем больше исходная шероховатость поверхности трения эгируется от оптимальной, тем больше износ в период приработки, а следовательно, тем меньше долговечность пары трения. Технология обработки поверхности трения значительно влияет на её долговечность, но не-

обоснованное завышение требований к шероховатости рабочих поверхностей трения деталей машин приводит к росту себестоимости изготовления изделия.

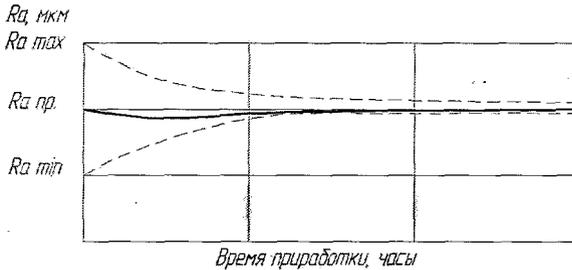


Рис. 1. График изменения параметра шероховатости Ra во времени при обработке

Таким образом, с точки зрения износа, шероховатость поверхности не зависит от первоначальной шероховатости, полученной при механической обработке. При этом шероховатость поверхности, образованная при трении, как правило, не может быть точно воспроизведена путем механической обработки.

На основании приведенных положений были сформулированы технические мероприятия по совершенствованию технологии обработки: зубошлифование исключается из техпроцесса, зубонарезание производится более точными червячными фрезами, предшествующая абразивной обработке закалка ТВЧ заменяется улучшением.

По исходному рабочему чертежу точность колёс по нормам кинематической точности, плавности работы и контакта зубьев соответствует 7-й степени точности, шероховатость эвольвентных поверхностей зубьев $Ra=1,6$ мкм, твёрдость зубьев HRC 43...48.

Снижение твёрдости до HB 269...302 (HRC 28...33) позволило заменить операцию шлифования фрезерованием с использованием более точной фрезы класса AA - 2510-4014AA P18 ГОСТ 9324-80, обеспечивающей седьмую степень точности по трем нормам [4]. При этом отделка для достижения эксплуатационной шероховатости переносится на этап приработки.

Кроме этого, было предложено исключение из технологического процесса плоскошлифовальной операции, сокращение числа контрольных операций с восьми до шести, а также слесарных с девяти до семи. В результате предложенных изменений технологии штучно-калькуляционное время изготовления колёс сократилось с 64,08 до 44,03 минут (на 31%).

После изготовления зубчатых колёс и сборки роторных насосов производилась начальная приработка на заводском испытательном стенде под

рабочей нагрузкой в течение 2,5 часов. При этом контролировался уровень шума при работе насосов, который во всех случаях не превышал допустимого значения 80 дБА.

Затем после разборки изделия производилось измерение параметров шероховатости эвольвентной поверхности зубьев для оценки приемлемости предлагаемых изменений.

Применительно к эвольвентным рабочим поверхностям прямозубых колес за направление измерения было принято направление вдоль эвольвенты, соответствующее относительному обкатному движению при работе. При таком выборе особенностью контроля шероховатости рабочих поверхностей зубьев зубчатых колёс является необходимость измерения по криволинейной (эвольвентной) траектории в условиях ограниченного пространства впадины зубьев с модулем 2 мм.

Измерение шероховатости производилось портативным прибором для профильного измерения шероховатости TR200 (Time Group Inc.), который позволяет контролировать тринадцать параметров шероховатости, отвечающих стандартам ISO, DIN, ANSI и JIS.

Объектами контроля являлись фрезерованные и шлифованные приработанные и неприработанные зубчатые колёса с модулем $m=2$ мм и числом зубьев $z=40$. С помощью встроенного интерфейса RS232 результаты измерения заносились в персональный компьютер.

При определении параметров шероховатости вдоль эвольвенты с помощью данного прибора штатный щуп профилометра не мог измерить шероховатость ввиду малого пространства впадины зубчатых колес. Для обеспечения доступа к поверхности измерения зубчатые колеса были разрезаны на электроэрозионном станке.

В качестве примера на рис. 2 приведены профилограммы реальной поверхности (Original) и прошедшей обработку через RC-фильтр (Filtered) фрезерованного и шлифованного колёс для исключения волнистости.

В результате измерений были получены следующие численные значения параметра шероховатости R_a эвольвентных поверхностей зубьев: шлифованных колёс до приработки $Ra3,3\pm 20\%$, после – $Ra2,5\pm 13\%$; фрезерованных колёс до приработки $Ra5,3\pm 28\%$, после – $Ra3,4\pm 20\%$. Таким образом, фрезерованное колесо прирабатывается интенсивнее по сравнению с закалённым шлифованным колесом.

В качестве иллюстрации приближения шероховатости к оптимальной равновесной, на рис. 3 приведены кривые относительной опорной длины профиля t_r шлифованного неприработанного и приработанного, а также фрезерованных колёс до и после приработки.

Как видно из рисунка, в верхней, «рабочей» части кривой, значение t_r как для шлифованных, так и фрезерованных приработанных колёс закономерно увеличивается, то есть, имеется тенденция приближения к форме теоретической кривой для равновесной шероховатости.

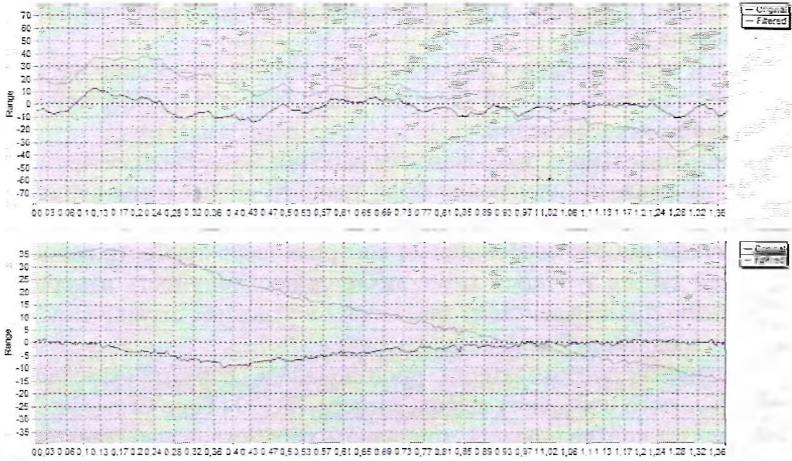


Рис. 2. Профилограммы фрезерованной (сверху) и шлифованной (снизу) поверхностей: Original - реальная поверхность; Filtered – поверхность, прошедшая обработку через фильтр

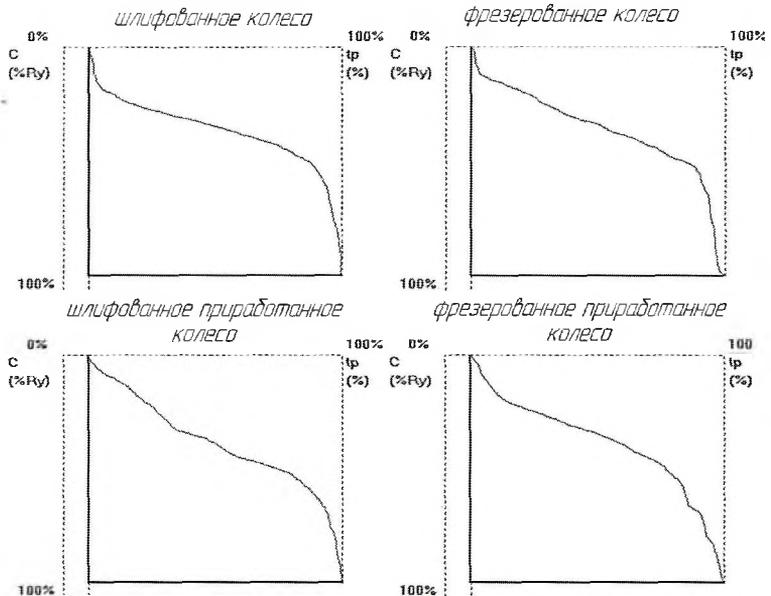


Рис. 3. Кривые относительной опорной длины профиля t_p

С целью проверки ресурса зубчатых колёс, изготовленных по новой технологии и имеющих меньшую твёрдость, был произведён расчёт на прочность и долговечность активных поверхностей зубьев до и после изменения техпроцесса.

Рассчитывались контактные напряжения на активных поверхностях зубьев и сравнивались с допустимыми значениями, при которых будет обеспечен требуемый уровень прочности и долговечности колёс [5].

Были получены следующие значения контактных напряжений: для шлифованного колеса $\sigma_H=397,9$ МПа $< [\sigma_H]=1586,3$ МПа, для фрезерованного - $\sigma_H=397,8$ МПа $< [\sigma_H]=704,4$ МПа.

Следовательно, даже при меньшей твёрдости и большей исходной шероховатости эвольвентных поверхностей зубчатых колёс прогнозируется заданный срок службы.

При этом себестоимость изготовления одного зубчатого колеса составила: для шлифованного колеса - $C=61225$ бел. руб., для фрезерованного - $C=27325$ бел. руб. Таким образом, себестоимость изготовления зубчатых колёс снизилась на 55%.

Вместе с тем, по причине снижения твёрдости зубьев следует ожидать уменьшения срока службы колёс, изготавливаемых по новой технологии. Для комплексной оценки эффективности принятых изменений было рассчитано отношение себестоимости изготовления колёс по вариантам технологического процесса ко времени отработки заданного ресурса:

$$K_{CL} = C/L_h, \text{ руб./ч,} \quad (1)$$

где C - себестоимость изготовления одного колеса, руб.;

L_h - время отработки заданного ресурса, ч.

Рассчитанное время отработки заданного ресурса составило: для шлифованного колеса - 8833 ч., для фрезерованного - 5361 ч.

Подставив численные значения величин в выражение (1), получим следующие значения: для шлифованного колеса - $K_{CL} = 6,9$ бел. руб./ч, для фрезерованного - $K_{CL} = 5,1$ бел. руб./ч.

Таким образом, себестоимость изготовления фрезерованного зубчатого колеса, отнесённая к одному часу срока службы, меньше, чем шлифованного колеса, что подтверждает экономическую целесообразность принятых решений.

Предложенные трудосберегающие изменения технологического процесса изготовления синхронизирующих зубчатых колес роторных насосов внедрены на машиностроительном предприятии.

На основании результатов исследований можно сделать вывод, что в обоснованных случаях можно рекомендовать замену зубошлифования приработкой без существенного снижения эксплуатационных качеств машин.

Список литературы

1. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
2. Крагельский И.В., Добрычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ. М., «Машиностроение», 1977. - 526 с.
3. Комбалов, В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М., «Наука», 1974.- 112 с.
4. Производство зубчатых колес: Справочник / С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган и др.; Под общ. ред. Б. А. Тайца. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990. — 464 с.
5. Расчёт на прочность деталей машин: Справочник/ И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Йосилевич. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1993. - 640 с.: ил.