

# ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.923.793

Акулович Л. М., Миранович А. В., Мисько В. Г.

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА КОМБИНИРОВАННЫХ СПОСОБОВ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*В статье описана методика синтеза комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле, основанная на анализе известных способов обработки по обобщенным критериям совместимости и учитывающая близость основных параметров кинематики процессов, а также подобие физико-химических механизмов совмещаемых способов нанесения покрытий, съема материала основы и модифицирования поверхностного слоя. В качестве основных технологий упрочнения, на которые базируются комбинированные способы, приняты магнитно-электрическое упрочнение и магнитно-абразивная обработка. Приведены результаты экспериментальных исследований производительности и отдельных показателей качества поверхностей при реализации комбинированных способов нанесения покрытий и финишной обработки.*

**Введение.** Известно [1], что в процессе эксплуатации выход из строя высоконагруженных деталей машин начинается, как правило, с разрушения поверхностных слоев, так как они наиболее сильно подвержены внешним воздействиям. Поэтому надежность и ресурс работы машин и механизмов в значительной мере зависит от свойств и состояния поверхностных слоев входящих в них деталей. Качество поверхностей деталей формируется на протяжении всего цикла технологического процесса их изготовления [2; 3]. Для упрочняющей обработки поверхностей деталей разработано большое количество методов [2; 4; 5] и технологий размерно-чистовой упрочняющей обработки [4–6], которые вписываются в классическое представление процесса обработки (ПО) как некоторой энергетической системы, воздействующей на заготовку с целью перехода ее из одного состояния в другое с новым качеством [7–9]. Это воздействие представляется в виде цепочки преобразования энергии и осуществляется в несколько этапов  $ПО = \{Э_{\text{раб}} \Rightarrow Э_{\text{возд}} \Rightarrow M_{\text{ф.х.}}\}$ . На первом этапе подводимая энергия преобразуется в рабочую  $Э_{\text{раб}}$  с помощью технологического оборудования. На втором этапе рабочая энергия превращается в энергию воздействия  $Э_{\text{возд}}$  на обрабатываемый объект. На третьем этапе энергия воздействия приводит к образованию физико-химических механизмов  $M_{\text{ф.х.}}$  обработки заготовки являющихся главным элементом формирования параметров качества поверхности и технико-экономических показателей процесса обработки. В результате все способы упрочняющей обработки поверхностей подразделяют на три класса: со съемом материала основы, с его преобразованием и с нанесением на поверхность других функциональных материалов.

Накопленный опыт показывает, что каждый способ упрочнения имеет свою конкретную область рационального применения и не может претендовать на универсальность. Традиционные способы упрочняющей обработки поверхностей исчерпали свои возможности, что в дальнейшем при их совершенствовании не позволяет существенно повышать параметры свойств изделий. Поэтому в машиностроении все более актуаль-

ным является применение комбинированных методов упрочняющей обработки поверхностей деталей, отличающихся тем, что процесс преобразования структуры поверхностного слоя или нанесения на поверхность материалов с другими свойствами происходит в результате протекания двух и более энергетических воздействий. В технологических процессах упрочнения используют механическую, тепловую, химическую, электрическую, магнитную, лучевую, акустическую виды энергии [10; 11]. Характер энергетического воздействия: распределенный, концентрированный, постоянный, пульсирующий, импульсный и др.

Комбинированные методы механической обработки позволяют снизить энергетические затраты, в 1,5–2 раза повысить производительность и отдельные показатели качества поверхностей.

**Целью настоящего исследования** является разработка методики синтеза способов комбинированного упрочнения поверхностей деталей машин в магнитном поле на основе известных технологий по обобщенным критериям, отражающим близость или подобие физико-химических механизмов, происходящих в каждом способе.

**Методика исследований.** Концептуальный подход синтеза комбинированных способов упрочняющей обработки поверхностей деталей машин в магнитном поле основывается на системной модели технологии, представляемой [8; 10] как воздействие на заготовку потоками энергии, технологических режимов и материалов. Энергии магнитного поля отводится доминирующая роль.

В комбинированных способах упрочняющей обработки поверхностей известные технологии реализуются путем как одновременного, так и последовательного энергетического воздействия различного вида, вызывающего соответствующие физико-химические эффекты. В методике синтеза используются обобщенные критерии совместимости, отражающие близость основных параметров или подобие физико-химических механизмов, происходящих в каждом из совмещаемых способов. При этом существует вероятность проявления синергетических эффектов, обусловленных как результат явлений самоорганизации при одновременном сочетании нескольких механизмов энергетического воздействия.

Близость основных технологических параметров совмещаемых способов, в общем случае, оценивается путем сравнительного анализа видов энергетического и материального воздействия на упрочняемую поверхность, а также технологических режимов. К ним относятся:

- виды применяемой энергии и параметры ее источников;
- химический состав материалов, наносимых на упрочняемую поверхность;
- кинематика процессов и величины основных технологических режимов.

Оценку подобия физико-химических механизмов в совмещаемых способах упрочнения можно проводить на основе положения теории подобия [12] по термодинамическим и тепловым процессам, а также по массопереносу. Совмещаемые процессы должны быть реализованы в близких геометрических и временных условиях (например, скорость, время, масса, плотность или сочетание единиц измерения), а математические модели, отражающие их состояние или функционирование, – иметь одинаковую физическую природу и описываться одинаковыми по форме и существу уравнениями. Степень подобия совмещаемых способов определяет вид комбинированной технологии: параллельная (обработка каждым способом совмещена во времени), последовательная (обработка каждым из совмещаемых способов производится последовательно) и последовательно-параллельная.

Предложенная методика предусматривает следующую последовательность синтеза способов комбинированного упрочнения в магнитном поле:

- анализ существующих способов упрочнения в магнитном поле поверхностей деталей, включающий вид и источник энергетического воздействия, вид материального

воздействия, особенности реализации технологии и используемое оборудование, оценку их возможностей;

– выбор из анализируемых способов упрочнения основного (базового) способа упрочнения в зависимости от поставленных задач, анализ его недостатков;

– проработка вариантов совмещения с основным способом существующих методов упрочняющей обработки и определение дополнительного технологического воздействия;

– экспериментальные исследования совместимости способов на основе подбора физико-химических механизмов и анализ полученных результатов.

**Результаты исследований.** Применительно к способам упрочняющей обработки поверхностей в магнитном поле, когда природа физических полей уже известна, предлагается более простой метод оценки их подобия (таблица).

Таблица – Оценка возможности совмещения способов упрочняющей обработки в магнитном поле поверхностей вращения

Дополнительные способы обработки	Основной (базовый) способ упрочняющей обработки				Вид совместимости
	Виды воздействий на поверхность				
	энергетическое		технологическое		
	общее	автономное	близкая	разная	
Магнитно-электрическое упрочнение					
Шлифование		+	+		Параллельный
Поверхностное пластическое деформирование		+	+		Параллельный
МИУ	+		+		Параллельно-последовательный
Лазерное упрочнение		+		+	Последовательный
МАО	+		+		Последовательный
Магнитно-абразивная обработка					
Шлифование		+	+		Параллельный
МИУ		+	+		Параллельный
Электрохимическое полирование		+	+		Параллельный

В зависимости от поставленной задачи основным способом упрочняющей обработки может быть магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) – для черновой обработки или магнитно-абразивная обработка (МАО) – для отделочно-чистовой. Оба эти способа можно реализовывать последовательно на одном оборудовании [13] после его переналадки.

Из таблицы следует, что МЭУ, шлифование и поверхностное пластическое деформирование (ППД) могут выполняться параллельно, а магнитно-импульсное упрочнение (МИУ) не совмещается с МЭУ по времени.

При МЭУ (рис. 1) заготовку 1 и полюсный наконечник 2 электромагнита располагают с определенным зазором между их поверхностями и подключают их к источнику технологического тока 6 с помощью скользящего контакта. В зазор из бункера-дозатора 4 непрерывно подают ферромагнитный порошок (ФМП), частицы которого выстраиваются в токопроводящие «цепочки» и замыкают контакты источника технологического тока. В результате происходит электрический разряд, под действием которого происходит плавление частиц ФМП в местах их контакта с поверхностью заготовки, что приводит к формированию на поверхности покрытий в виде сочетания множества точечных вкраплений округлой формы (рис. 2, а). Микроструктура упрочненного

слоя, обеспечивающая его физико-механические свойства, зависит от химического состава ФМП и материала основы. Толщина покрытий составляет до 0,2 мм, а шероховатость поверхности –  $Ra \geq 12,5$  мкм. Вместе с тем для процесса МЭУ присуща неравномерность распределения по упрочняемой поверхности отдельных вкраплений материала ФМП, вызванная спонтанным формированием токопроводящих цепочек из зерен ФМП и, как следствие, местом возникновения электрических разрядов. Это приводит как к снижению сплошности наносимого покрытия, так и к увеличению шероховатости поверхности.

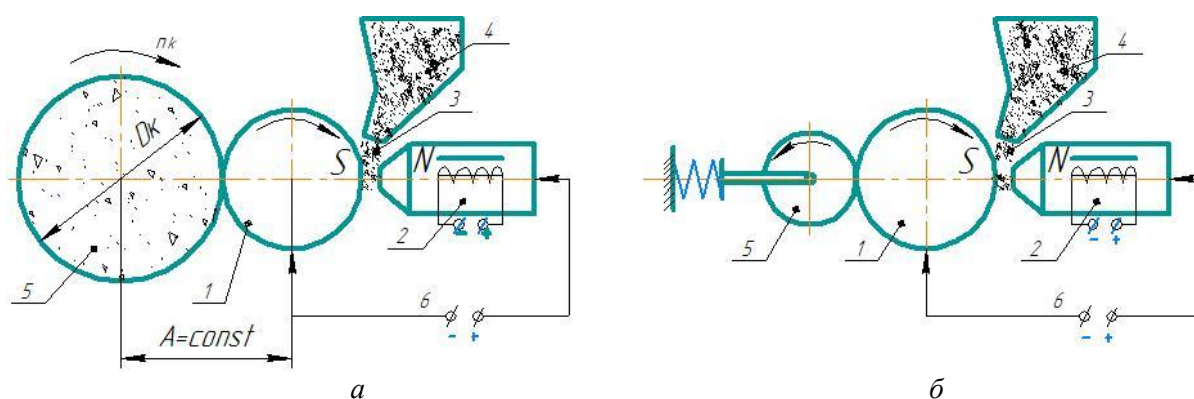


Рис. 1. Схема комбинированной упрочняющей обработки наружных цилиндрических поверхностей: а – МЭУ со шлифованием; б – МЭУ с ППД:  
N, S – полюсы магнитного поля; 1 – заготовка; 2 – полюсный наконечник магнита;  
3 – ФМП, 4 – бункер-дозатор; 5 – шлифовальный круг (а), деформирующий ролик или шарик (б); 6 – источник технологического тока

Уменьшить шероховатость поверхности можно шлифованием, которое совмещается с МЭУ на шлифовальном станке (рис. 1, а). При наладке шлифовальный круг устанавливают на требуемый размер диаметра обрабатываемой поверхности и межосевое расстояние  $A$  выдерживается постоянным на протяжении всего цикла обработки. По мере нанесения покрытия диаметральный размер будет увеличиваться только до достижения расстояния  $A$ , так как лишний слой будет срезаться шлифовальным кругом. Такая комбинированная обработка совмещает во времени нанесение покрытия и чистовую обработку его поверхности до шероховатости  $Ra \leq 1,25$  мкм, а также экономит расход ФМП, поскольку наносится только заданная толщина покрытия.

Наибольший эффект получен при совмещении МЭУ с ППД (рис. 1, б). В этом случае происходит дополнительно термомеханическое упрочнение. На упрочняемую поверхность одновременно воздействуют электромагнитные и термомеханические потоки энергии. Для разогрева поверхностного слоя используется технологическое тепло, образовавшееся энергией электрических разрядов. При таком комбинированном воздействии происходит формирование покрытия, нагрев образовавшихся неровностей, их деформирование и сглаживание поверхности (рис. 2, б). Происходящие в поверхностном слое структурные и фазовые превращения определяют физико-механические свойства покрытий. Шероховатость поверхности при этом уменьшается до  $Ra 1,25-0,63$  мкм.

Важнейшей характеристикой топографии поверхности с точки зрения эксплуатационных свойств деталей является опорная кривая, характеризующая распределение металла по высоте в шероховатом поверхностном слое. Экспериментально установлено, что комбинированное упрочнение значительно увеличивает опорную поверхность. До половины высоты профиля опорная поверхность после ППД, совмещенной с МЭУ, увеличивается в 2–3 раза (рис. 3). После шлифования и магнитно-абразивной обработки ве-

личина опорной поверхности еще более увеличивается. Однако, для сохранения толщины нанесенного покрытия предпочтительно применять бесстружковые методы последующей обработки упрочненных поверхностей. Поэтому, где это возможно, при механической обработке упрочненных и восстановленных деталей следует обходиться без операций шлифования.

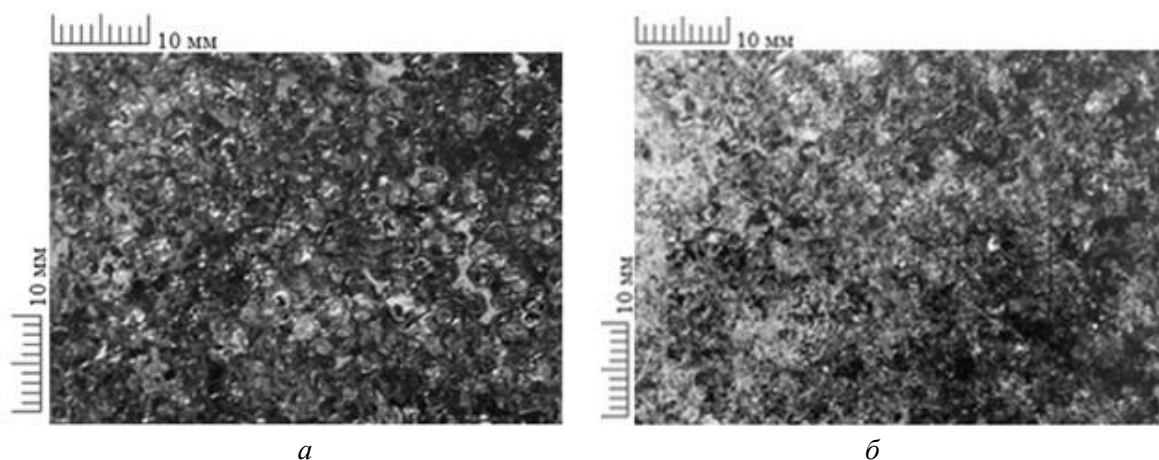


Рис. 2. Фотография поверхности после МЭУ: а – после МЭУ; б – МЭУ с ППД

Вторым основным способом упрочнения деталей в магнитном поле путем улучшения топографии их поверхностей (см. табл.) является МАО, которую можно совмещать с МИУ путем конструирования магнитных систем в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4 [14].

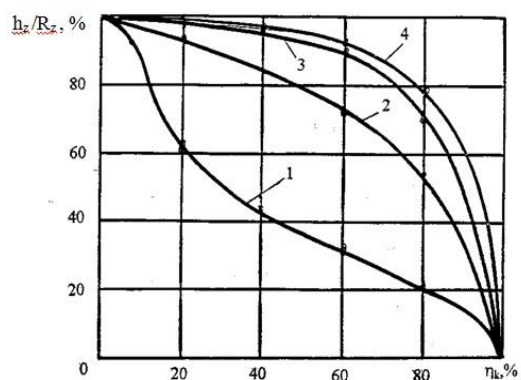


Рис. 3. Опорные кривые упрочненных поверхностей:  
 1 – МЭУ; 2 – МЭУ + ППД;  
 3 – МЭУ + шлифование;  
 4 – МЭУ + шлифование + МАО;  $h_z$  – высота уровня;  $R_z$  – высота неровностей;  
 $\eta_k$  – отношение отрезков внутри контура ко всей длине

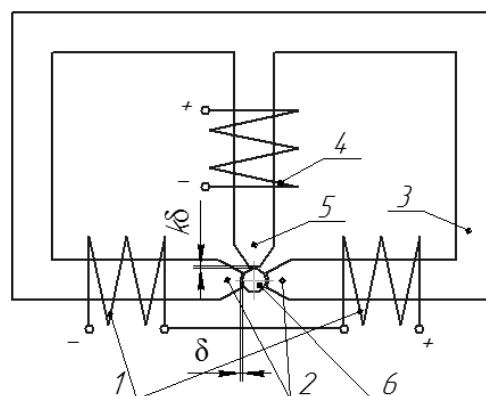


Рис. 4. Принципиальная схема магнитной системы при совмещении МАО и МИУ наружных цилиндрических поверхностей:  
 1 – катушка электромагнита для МАО;  
 2, 5 – полюсные наконечники;  
 3 – магнитопровод;  
 4 – катушка электромагнита для МИУ;  
 6 – заготовка

Обрабатываемую заготовку 6 располагают с определенными зазорами  $\delta$  между полюсными наконечниками 2. Зазоры заполняют ферроабразивным порошком. Абразивные зерна порошка под действием энергии магнитного поля, создаваемого катушками 1 основной магнитной системы, удерживаются в зазоре и, ориентируясь наибольшей осью по направлению магнитных силовых линий, создают ферроабразивную щетку, ко-

торая прижимается к обрабатываемой поверхности силой магнитного поля. Детали сообщают вращательное и возвратно-поступательное осциллирующее движения, что обеспечивает перемещение обрабатываемой поверхности относительно абразивных зерен. Поскольку каждое зерно ориентируется по направлению магнитных силовых линий, то к обрабатываемой поверхности обращены наиболее острые режущие кромки. В процессе МАО режущие кромки абразивных зерен изнашиваются, уменьшается режущая способность ферроабразивной щетки и требуется ее регенерация. Функцию регенерации выполняет дополнительная магнитная система (ДМС), которая состоит из катушки индуктивности 4, полюсного наконечника 5 и источника питания (на рис. 4 не показан). Магнитопровод 3 у основной и дополнительной систем является общим.

ДМС используется для управления направлением силовых магнитных линий основной магнитной системы, что позволяет переместить абразивную щетку в зону входа в рабочий зазор [14] и сориентировать ее таким образом, чтобы режущие кромки абразивных зерен имели положительные передние углы ( $+\gamma$ ). Это позволяет управлять интенсивностью резания и шероховатостью поверхности.

Кроме регенерации ферроабразивной щетки и управления величиной угла наклона абразивных зерен, ДМС позволяет осуществлять МИУ поверхностного слоя детали. Для этого в процессе МАО дополнительная магнитная система периодически (через 3–5 с) генерирует импульсы магнитного поля (не менее 2 Тл) длительностью каждого до 6 с. Импульсный характер дополнительного магнитного поля осуществляет модифицирование поверхностного слоя детали.

Физическая сущность модифицирования основывается [15] на изменении многими материалами своих физико-механических свойств под воздействием импульсных магнитных полей. Улучшение при МИУ свойств поверхностей деталей из ферромагнитных материалов связано с направленной ориентацией свободных электронов металла во внешнем магнитном поле, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость металла. При изменяющемся по величине и по направлению магнитном поле происходит переориентация спина с определенной циклическостью и изменением его направления, что отражается на химической связи металлических соединений в поверхностного слоя. Эта ориентация происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность металла. При МИУ в поверхностном слое возникают вихревые токи и локальные микровихри, которые нагревают участки вокруг кристаллитов напряженных блоков и неоднородностей структуры металла, создавая очаги градиента напряжений. На таких участках возрастает вероятность разрыва межатомных связей. В тех местах, где локальные напряжения превышают пределы упругости материала, формируются очаги пластической деформации, что свидетельствует об упрочнении металлической поверхности. Именно здесь интенсивно протекают процессы размножения и перемещения дислокаций. Чем выше концентрация поверхностных и внутренних напряжений в металле, тем больше вероятность локальной концентрации в них микровихрей внешнего поля и возникающих вихревых токов, которые нагревают тонкий поверхностный слой. Выделяющаяся теплота расходуется на процессы, связанные с фазовыми превращениями 1-го и 2-го рода и улучшением микроструктуры материала поверхностного слоя. С увеличением плотности дислокации, сталь претерпевает своеобразный наклеп [15], что выражается в изменении параметра решетки мартенсита и снижении температуры обратного мартенситного превращения. Указанные явления проявляются также и в процессах МЭУ и МАО.

В процессе изготовления деталей машин в их материале концентрируется некоторое количество избыточной энергии. Неравномерная концентрация избыточной энергии вызывает ее преобразование, что приводит к концентрации внутренних напряжений в материале и снижению физико-механических свойств. МИУ значительно уменьшает избыточную энергию материала, связанную с концентрацией внутренних и поверхностных напряжений в детали.

Кроме воздействия импульсным магнитным полем, при вращении заготовки в процессе МАО (см. рис. 4) происходит перемещение цилиндрической поверхности относительно силовых линий магнитного поля, что приводит к возникновению в поверхностном слое индукционных вихревых токов переменного направления. При многократном перемагничивании возникающие электромагнитные и пластические эффекты снижают прочностные характеристики материала поверхностного слоя. Из-за скин-эффекта вся тепловая энергия концентрируется в поверхностных слоях. Суперпозиция основного и дополнительного магнитных полей усиливает нагрев поверхностного слоя. Это способствует пластическому деформированию при абразивном резании и «выглаживанию» поверхности абразивными зернами, что увеличивает ее опорную площадь и снижает шероховатость.

Экспериментально установлено, что суперпозиция основного и дополнительного магнитных полей при совмещении МАО и МИУ повышает производительность обработки до 1,8 раза и увеличивает твердость поверхностного слоя на глубине 5 мкм на 18–20 %, а топография поверхности не сопровождается заметным изменением шага неровностей, образовавшихся на предшествующих операциях обработки.

**Заключение.** Синтез комбинированных способов упрочнения поверхностей деталей в магнитном поле, основанный на системной модели технологии и анализе известных способов обработки по обобщенным критериям совместимости, учитывает близость основных параметров кинематики процессов, а также подобие физико-химических механизмов совмещаемых способов нанесения покрытий, съема материала основы и модифицирования поверхностного слоя. Процесс преобразования структуры поверхностного слоя или нанесения на поверхность материалов с другими свойствами происходит в результате протекания двух и более энергетических воздействий. Экспериментально установленные повышение производительности рассмотренных комбинированных способов упрочнения и отдельных показателей качества поверхностей можно объяснить проявлением синергетических эффектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В. Б. Альгин [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. Навука. 2010. – 109 с.
2. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск : Беларус. навука. 2013. – 463 с.
3. Финишная обработка поверхностей / С. А. Клименко и др.; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск : Беларус. навука. 2017. – 377 с.
4. Поляк, М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2т. Т.1. – Москва : ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение. 1995. – 832 с.
5. Поляк, М. С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения. В 2т. Т.2. – Москва : ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение. 1995. – 688 с.
6. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк : ДонНТУ. 2008. – 346 с.
7. Смоленцев, Е. В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение. 2005. – 511 с.
8. Подураев, В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М. : Машиностроение. 1985. – 264 с.
9. Бабичев, А. П. Физико-технологические основы методов обработки. – Ростов н/Д : Феникс. 2006. – 409 с.
10. Рыжов, Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Киев : Наукова думка. 1989. – 192 с.
11. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ. 1999. – 240 с.

12. Иванов, И. Е. Методы подоби́я физических процессов: учеб. пособие / И. Е. Иванов, В. Е. Ерещенко. – М. : МАДИ. 2015. – 144 с.

12. Кульгейко, М. П. Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестник Белорусско-Российского ун-та. 2020. №4(69). – С. 21–30.

14. Акулович Л. М. Упрочняющая магнитно-абразивная обработка поверхностей с управлением процессом резания / Л. М. Акулович, О. Н. Ворошуха // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 1 (181). – С. 3–8.

15. Алифанов, А. В. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. 2012. № 3. – С. 77–82.

Поступила 05.09.2022

УДК 621.923.6

Ажар А. В., Минасян Г. О., Осадчий Е. Н., Ишкуло П. Ю.

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЗАТОЧКА ЗУБОРЕЗНЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА 3D-МОДЕЛИ ОПЕРАЦИИ ЗАТЫЛОВАНИЯ

*Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь*

*Показано, что наибольшую производительность операции затылования профильных (фасонных) фрез обеспечивают цилиндрические спрофилированные шлифовальные круги. Максимальный диаметр шлифовального круга зависит от требуемой длины затылованной части зуба и ограничен условием врезания в соседний зуб. Установлено, что принятый метод расчета диаметра круга не позволяет обеспечить условия оптимального затылования фрезы, и не учитывает ряд ее конструктивных параметров. Предложенный метод 3D моделирования операции затылования дает более широкие возможности по оптимизации технологии заточки фрез и конструкции инструмента на этапе проектирования и подготовки производства.*

**Введение.** Дисковые модульные фрезы – это разновидность профильных (фасонных) насадных фрез для нарезания зубчатых изделий [1]. Они применяются для черного и чистового нарезания прямозубых цилиндрических колес, черного нарезания зубьев косозубых колес, черного, а иногда чистового нарезания прямозубых конических колес, зубчатых реек, шлицевых валов методом копирования в условиях единичного и мелкосерийного производства. Теоретически для каждого нарезаемого колеса необходимо иметь свою фрезу. Практически, с некоторой погрешностью, одной фрезой данного модуля можно обрабатывать зубчатые колеса с числом зубьев определенного интервала. Установлено два набора: из 8-ми фрез для нарезания колес с модулем до 8 мм; из 15-ти фрез для колес с модулем свыше 8 мм [2].

Дисковые фрезы применяются на универсальных и специализированных фрезерных станках, в том числе и с ЧПУ. Уступая по производительности и точности инструментам работающим методом обката (червячные фрезы, долбяки), они обеспечивают достаточно эффективное изготовление небольших партий или единичных экземпляров деталей с зубчатым профилем за счет простой кинематики формообразования при наличии делительных устройств.

При проектировании, изготовлении и восстановлении дисковых зуборезных фрез возникают типовые проблемы характерные большинству профильных фрез. Они связаны с особенностями формирования профиля и задней поверхности зуба инструмента,