

УДК 621.777.4

**Драгобецкий В. В.**  
**Фролов В. К.**  
**Наумова М. И.**  
**Шаповал А. А.**

## **МЕТОДЫ ПОИСКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ**

Большая номенклатура деталей, применяемых при изготовлении изделий воздушного, морского и наземного транспорта, агрегатах и механизмах содержат глубокие отверстия малого диаметра. Причем, в результате всестороннего развития, совершенствования и интенсификации промышленного производства номенклатура деталей с глубокими отверстиями увеличивается. Такие детали находят широкое применение при производстве штамповой оснастки, гидропневмоаппаратуры, газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания, стрелкового оружия и др. Обеспечение и формирование качества поверхностного слоя отверстий, как правило, осуществляется на финишных операциях и связано со значительными трудностями.

Из анализа современного состояния проблемы финишной обработки глубоких отверстий малого диаметра [1–4] можно сделать следующее заключение:

– эффективность большинства методов интенсифицирующих процесс финишной обработки глубоких отверстий малого диаметра практически сводится к нулю [4];

– при финишной обработке глубоких отверстий малого диаметра приведенная режущая способность и коэффициент шлифования в десятки, а иногда в сотни раз меньше регламентированных государственными стандартами, процент активных зерен не превышает 4–6% [4] и др.;

– в условиях пониженной жесткости инструмента при финишной обработке глубоких отверстий малого диаметра основным физико-химическим механизмом обработки является пластическая деформация [2, 3];

– уменьшить число пластически деформируемых зерен в обрабатываемом металле можно с использованием шлифовальной головки, имеющей переменную изгибную жесткость, увеличив скорость резания или возбуждая колебания [1].

В целом финишная обработка глубоких отверстий малого диаметра связана с низкой стойкостью шлифовальных кругов и повышенным расходом инструментального материала. Это является серьезной, решение которой в масштабах страны сулит значительные экономические выгоды и связана с решением комплекса научно-технических задач.

Целью работы является изыскание путей совершенствования условий финишной обработки глубоких отверстий малого диаметра.

Решение поставленной задачи можно осуществить, как правило, путем использования специализированных методов направленного синтеза [5, 6].

При этом нахождение оригинальных решений связано не только с применением перебора или упорядоченных вариантов, но и сочетанием этих методов с неупорядоченными методами поиска [5]. Среди таких методов или подходов приоритет принадлежит обобщенному эвристическому методу [5–9]. Этот метод предлагает наличие систематизированных баз данных известных и новых технических решений, физико-технических эффектов и эвристических приемов [5–10].

Фонд физико-технических эффектов необходимо дополнить законами, принципами и эффектами, присущими процессам пластического деформирования и отделения материала. В этот массив включены эффекты, описанные в работе Алиева И. С. [5–9] и дополненные авторами:

- эффекты самоорганизации процессов деформирования и разрушения (наименьшего сопротивления, наименьшего периметра, неравномерности деформаций, дополнительных напряжений);
- эффекты самопроизвольного формоизменения и разрушения материала;
- эффекты изменения направления главного вектора упругой деформации и разгрузки при пластическом деформировании;
- эффекты, сопутствующие тепловому воздействию;
- эффект Баушингера;
- эффекты упрочнения и разупрочнения;
- эффекты импульсного воздействия;
- эффекты влияния скорости деформирования;
- принципы и условия повышения или снижения технологической деформируемости;
- принципы и условия снижения деформирующих сил;
- принципы создания комбинированных методов обработки;
- эффект вибропластичности, сверхпластичности, электропластичности;
- эффект Ребиндера;
- эффект аномально-низкого трения.

В этом массиве физико-технических эффектов отметим импульсное воздействие. Импульсное нагружение приводит к возникновению одновременно возникающих факторов. Последние можно реализовать при различных схемах статического нагружения.

В соответствии со стратегией объединенного эвристического метода необходимо сформировать морфологическую таблицу.

Задачей морфологического анализа при выборе способов повышения эффективности внутреннего шлифования глубоких отверстий методом продольной подачи является систематизация, обзор и анализ всех возможных методов решения сложной многоплановой проблемы. Решаемую проблему разделяем на части, которые считаем независимыми, и для каждой из частей находим максимальное число решений или подходов. На первом этапе выделяем наиболее важные аспекты, которые впоследствии выступают в качестве оснований деления  $Y_i$ . Затем для каждого  $i$ -го аспекта выделяем возможные варианты  $y_j^i$ . Возможных аспектов проблемы может быть  $n$ , т.е.  $n = 1, 2, \dots, n$ , а возможных вариантов  $i$ -го аспекта –  $k$ , т.е.  $k = 1, 2, \dots, k$ .

Совокупность аспектов проблемы выбора состава и способа повышения эффективности шлифования глубоких отверстий представляем в виде системы матриц, называемых «морфологическим множеством»:

$$\begin{aligned} Y_1(y_1^1, y_2^1, \dots, y_j^1, \dots, y_k^1); \\ Y_2(y_1^2, y_2^2, \dots, y_j^2, \dots, y_k^2); \\ \dots \\ Y_n(y_1^n, y_2^n, \dots, y_j^n, \dots, y_k^n) \end{aligned} \quad (1)$$

Если в каждой строке этой матрицы выделить один из элементов  $y_j$ , а затем соединить все выделенные элементы, то полученная цепочка элементов будет представлять один из возможных вариантов решения проблемы. Некоторое единичное решение проблемы можно представить системой элементов

$$Y_1(y_j^1), Y_2(y_j^2), \dots, Y_n(y_j^n). \quad (2)$$

На следующем этапе определяем, какие из этих решений осуществимы в действительности. Все осуществимые решения анализируем и производим выбор оптимального. Систематическое изучение всех возможных комбинаций решений приведет к определению принципиально новых решений всей проблемы в целом.

Рассмотрим укрупненную технологию обработки глубоких отверстий (рис. 1). Можно выделить три аспекта  $Y_i$ , характеризующих ее развитие. Для каждого из этих аспектов можно найти несколько вариантов решений  $y_j^i$ .

Аспекты проблемы	$y_j^i$	Варианты развития
Обрабатываемое отверстие	$Y_i^1$	$y_1^1$ $y_2^1$
Метод финишной обработки	$Y_i^2$	$y_1^2$ $y_2^2$ $y_3^2$
Методы обработки со съемом материала	$Y_{lm}^2$	$y_{11}^2$ $y_{12}^2$ $y_{13}^2$ $y_{14}^2$
Методы обработки без съема материала	$Y_{2n}^2$	$y_{21}^2$ $y_{22}^2$ $y_{23}^2$ $y_{24}^2$
Комбинированные методы	$Y_{3z}^2$	$y_{31}^2$ $y_{32}^2$ $y_{33}^2$ $y_{34}^2$ $y_{35}^2$ $y_{36}^2$ $y_{37}^2$ $y_{38}^2$ $y_{39}^2$
Методы повышения эффективности внутреннего шлифования	$Y_i^3$	$y_1^3$ $y_2^3$ $y_3^3$ $y_4^3$ $y_5^3$ $y_6^3$
По схеме взаимодействия с обрабатываемым материалом	$Y_i^4$	$y_1^4$ $y_2^4$ $y_3^4$ $y_4^4$
Распределение нагрузки во времени	$Y_i^5$	$y_1^5$ $y_2^5$ $y_3^5$ $y_4^5$
По схеме движения	$Y_i^6$	$y_1^6$ $y_2^6$ $y_3^6$ $y_4^6$
Методы стабилизации инструментов	$Y_i^7$	$y_1^7$ $y_2^7$ $y_3^7$ $y_4^7$ $y_5^7$ $y_6^7$ $y_7^7$

Рис. 1. Морфологическая таблица

Обрабатываемое отверстие  $Y_i^1$ :

$y_1^1$  – отверстие с соотношением глубины  $H$  к диаметру  $D$   $5 < H/D < 10$ ;

$y_2^1$  – отверстие с соотношением глубины к диаметру  $H/D > 10$ .

Следует отметить, что принятые соотношения весьма условны, и область принятых технических решений может быть значительно расширена.

Метод финишной обработки –  $Y_i^2$ :

$y_1^2$  – методы обработки со съемом материала (внутреннее круглое шлифование);

$y_2^2$  – методы обработки без снятия материала;

$y_3^2$  – комбинированные.

В свою очередь виды финишной обработки в пределах вариантов аспекта имеют свои варианты решений. Поэтому для данного аспекта вводим дополнительный индекс «m», т.е.  $y_{jm}^2$ . Тогда для внутреннего круглого шлифования  $Y_{lm}^2$ :

$y_{11}^2$  – обычный способ, деталь закрепляется в патроне и имеет вращательное движение; круг вращается и имеет возвратно-поступательное движение и поперечную подачу на каждый двойной ход;

$y_{12}^2$  – планетарный способ;

$y_{13}^2$  – способ двойного технологического воздействия;

$u_{14}^2$  – способ шлифования профилированным инструментом.

Методы чистовой обработки отверстий без снятия материала, а именно методы обработки металлов давлением находят все более широкое применение в промышленности и включают процессы  $Y_{2n}^2$

$u_{21}^2$  – прошивание и протягивание выглаживающими прошивками и протяжками;

$u_{22}^2$  – раскатывание роликовыми и шариковыми раскатками;

$u_{23}^2$  – раскатывание роликовыми раскатками ударного действия;

$u_{24}^2$  – динамический наклеп шарами.

Комбинированные методы –  $Y_{3z}^2$ :

$u_{31}^2$  – виброабразивная обработка;

$u_{32}^2$  – абразивная обработка в струе жидкости;

$u_{33}^2$  – магнитно-абразивная;

$u_{34}^2$  – свободным абразивом, уплотненным инерционными силами;

$u_{35}^2$  – электрохимическое шлифование;

$u_{36}^2$  – анодно-абразивная;

$u_{37}^2$  – электроалмазная;

$u_{38}^2$  – электроэрозионно-химическая;

$u_{39}^2$  – абразивно-электроэрозионная.

Методы повышения эффективности внутреннего шлифования –  $Y_i^3$ :

$u_1^3$  – скоростное шлифование;

$u_2^3$  – глубинное шлифование;

$u_3^3$  – струйно-абразивная обработка;

$u_4^3$  – обработка свободным абразивом;

$u_5^3$  – использование принципа стабилизации положения инструмента в процессе шлифования;

$u_6^3$  – использование принципа создания переменного контакта инструмента с заготовкой.

По схеме взаимодействия (контакта) с обрабатываемым материалом  $Y_i^4$ :

$u_1^4$  – точечное;

$u_2^4$  – линейное;

$u_3^4$  – поверхностное;

$u_4^4$  – объемное.

Последний вариант может быть реализован при применении методов пластического деформирования и импульсных методов металлообработки: кавитационных, электрогидравлических, взрывных и т.д.

По виду распределения нагрузки на обрабатываемый материал во времени –  $Y_i^5$ :

$u_1^5$  – непрерывное;

$u_2^5$  – пульсирующее;

$u_3^5$  – ударное;

$u_4^5$  – импульсное.

По схеме движения формообразования –  $Y_i^6$ :

$u_1^6$  – неподвижное;

$u_2^6$  – прямолинейное;

$u_3^6$  – вращательное;

$u_4^6$  – вращательно-поступательное.

Методы, основанные на принципе стабилизации положения инструмента при внутреннем шлифовании следующие –  $Y_i^7$ :

$u_1^7$  – применение конических оправок;

$u_2^7$  – применение твердосплавных оправок;

$u_3^7$  – самоцентрирование ротора;

$u_4^7$  – применение СОЖ;

$u_5^7$  – применение эльбора;

$u_6^7$  – увеличение частоты вращения;

$u_7^7$  – изменение вектора упругой разгрузки обрабатываемого материала на инструмент.

Анализ данной модели показывает, что в рамках компетенции авторов существует  $3 \times 4 \times 4 \times 9 \times 6 \times 4 \times 4 \times 4 \times 7 = 1161216$  вариантов методов обработки. Сочетание  $u_2^1 \cdot u_1^2 \cdot (u_5^3 + u_6^3) \cdot u_2^4 \cdot u_2^5 \cdot u_3^6 \cdot u_7^7$  соответствует процессу шлифования глубоких отверстий малого диаметра с использованием принципа стабилизации положения инструмента в условиях переменного контакта с заготовкой. Кроме того, выявлен дополнительный эффект при обработке в условиях пониженной жесткости технологической системы. Реализация принципа управления векторов упругой разгрузки позволит разработать принципиально новые конструкции эльборовых кругов для обработки глубоких отверстий малого диаметра.

## ВЫВОДЫ

Применение морфологического анализа позволило систематизировать методику выбора оборудования и процесса для производства слоистых металлических композиций. Системное изучение возможных комбинаций решений проблемы формоизменения привело не только к решению задачи, но и к принципиально новой технологии и необходимости создания новых машин для изготовления слоистых композиций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров И.П. Шлифование глубоких отверстий малого диаметра: проблемы и решения / И. П. Никифоров. – Псков: Изд-во политехн. ин-та, 2006. – 200 с.
2. Никифоров И.П. Новая концепция решения проблем внутреннего шлифования в условиях пониженной жесткости / И. П. Никифоров // *Металлообработка*. – 2005. – №6. – С. 5–8.
3. Никифоров И.П. К вопросу о геометрии абразивного зерна / И. П. Никифоров // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2006. – №9. – С. 65–68.

4. Никифоров И.П. Методы повышения эффективности внутреннего шлифования в условиях пониженной жесткости / И. П. Никифоров // Труды Псковского политехнического института. – Санкт-Петербург/Псков: Изд-во СПбГТУ. – 2002. – №6. – С. 279–283.
5. Алиев И.С. Эвристические приемы поиска новых технологических решений в области штамповки / И. С. Алиев // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії. Зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001. – С. 217–221.
6. Алиев И.С. Поиск и классификация новых технологических способов выдавливания / И. С. Алиев // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії. Зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000. – С. 207–212.
7. Ерохина Л.С. Методы прогнозирования развития конструкционных материалов / Л.С. Ерохина, К.В. Калугина, С.К. Михайлов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 256 с.
8. Добров Г.М. Прогнозирование науки и техники / Г. М. Добров. – М.: Наука, 1977. – 212 с.
9. Трушевская Л.П. Применение морфологического анализа при выборе и прогнозировании технологии листового проката / Л.П. Трушевская, Л.М. Драгобецкая, В.В. Драгобецкий // Проблемы создания новых машин и технологий. Научные труды КГПУ. – Кременчуг : КГПУ, 2001. – Вып. 1/2001 (10). – С. 399–401.
10. Алиев И.С. Интенсификация технологических процессов выдавливания полых деталей / И.С. Алиев, В.П. Еремин // Совершенствование процессов и машин ОМД. – Киев: УМК ВО, 1988. – С. 9–18.

## REFERENCES

1. Nikiforov I.P. Shlifovanie glubokih otverstij malogo diametra: problemy i reshenija / I. P. Nikiforov. – Pskov: Izd-vo politehn. in-ta, 2006. – 200 s.
2. Nikiforov I.P. Novaja koncepcija reshenija problem vnutrennego shlifovanija v uslovijah ponizhennoj zhestkosti / I. P. Nikiforov // Metalloobrabotka. – 2005. – №6. – S. 5–8.
3. Nikiforov I.P. K voprosu o geometrii abrazivnogo zerna / I. P. Nikiforov // Izvestija vuzov. Mashinostroenie. – 2006. – №9. – S. 65–68.
4. Nikiforov I.P. Metody povyshenija jeffektivnosti vnutrennego shlifovanija v uslovijah ponizhennoj zhestkosti / I. P. Nikiforov // Trudy Pskovskogo politehnicheskogo instituta. – Sankt-Peterburg/Pskov: Izd-vo SPbG-TU. – 2002. – №6. – S. 279–283.
5. Aliiev I.S. Jevristicheskie priemy poiska novyh tehnologicheskikh reshenij v oblasti shtampovki / I. S. Aliiev // Udoskonalennja procesiv ta obladnannja obrobki tiskom v mashinobuduvanni i metalurgii. Zb. nauk. pr. – Kramators'k, 2001. – S. 217–221.
6. Aliiev I.S. Poisk i klassifikacija novyh tehnologicheskikh sposobov vydavlivanija / I. S. Aliiev // Udoskonalennja procesiv ta obladnannja obrobki tiskom v mashinobuduvanni i metalurgii. Zb. nauk. pr. – Kramators'k, 2000. – S. 207–212.
7. Erohina L.S. Metody prognozirovanija razvitija konstrukcionnyh materialov / L.S. Erohina, K.V. Kalugina, S.K. Mihajlov. – L.: Mashinostroenie, 1980. – 256 s.
8. Dobrov G.M. Prognozirovanie nauki i tehniki / G. M. Dobrov. – M.: Nauka, 1977. – 212 s.
9. Trushevskaja L.P. Primenenie morfologicheskogo analiza pri vybore i prognozirovanii tehnologii listovogo prokata / L.P. Trushevskaja, L.M. Dragobeckaja, V.V. Dragobeckij // Problemy sozdaniya novyh mashin i tehnologij. Nauchnye trudy KGPU. – Kremenchug : KGPU, 2001. – Vyp. 1/2001 (10). – S. 399–401.
10. Aliiev I.S. Intensifikacija tehnologicheskikh processov vydavlivanija polyh detalej / I.S. Aliiev, V.P. Eremin // Sovershenstvovanie processov i mashin OMD. – Kiev: UMK VO, 1988. – S. 9–18.

- Драгобецкий В. В. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТМ КНУ  
 Фролов В. К. – канд. техн. наук, доц. каф. ТМ НТУУ КПИ  
 Наумова М. И. – студент НТУУ КПИ  
 Шаповал А. А. – канд. техн. наук, ст. преп. каф. ТМ КНУ

КНУ – Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, г. Кременчуг.

НТУУ КПИ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Статья поступила в редакцию 16.03.2016 г.