

УДК 621.10.675

## Про використання функціонально-орієнтованого підходу при розробці гібридних процесів обробки композиційних матеріалів

Саленко О.Ф.<sup>1</sup>, Клименко С.А.<sup>2</sup>, Щегинін В.Т.<sup>3</sup>, Лашко Є.Є.<sup>3</sup>, Коваленко С.В.<sup>4</sup>, Мохамед Р.Ф.Будар<sup>5</sup>

<sup>1</sup>КПІ ім. І.Сікорського, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>ІНМ ім.В.Бакуля, м.Київ, Україна

<sup>3</sup>КрНУ фм. М.Остроградського, м. Кременчук, Україна

<sup>4</sup>Кропивницький інженерний коледж ЦНТУ, м.Кропивницький, Україна

<sup>5</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет, м.Кропивницький, Україна

**Анотація:** *Композиційні матеріали, використовувані у сучасному машинобудуванні, характеризуються не тільки сукупністю унікальних властивостей, що обумовлює сфери їх використання, а і мають у переважній більшості низьку оброблюваність. Схильність до деструкції, висока абразивність, мікроруїнування когезійного та адгезійного характеру обумовлює активний пошук способів і методів керованого впливу з метою формоутворення. Пропонується застосовувати функціонально-орієнтований підхід до гібридизації обробних процесів. Оскільки усі процеси можна класифікувати за видом впливу, його локалізацією, напрямком дії, явищами перетворення тіла матеріалу та утворення нових поверхонь поділу, у той час як утворені поверхні – за типом, точністю, функціональним призначенням, отримуємо можливість шляхом постановки одно- або багатокритеріальної задачі оптимізації визначити раціональні варіанти виконання обробки із множини можливих. Перевіряючи можливість сполучення окремих дій і впливів на заготовку, визначають умови та можливості гібридизації процесу, використовуючи комбінований інструмент. Приведені результати контурного різання пластин з полікристалічних напівтвердих матеріалів.*

*Ключові слова:* композиції, гібридні процеси, обробка, функціональний підхід

Размерная обработка изделий из композиционных материалов, в частности, контурное разрезание призматических и круглых элементов, плоских заготовок произвольной формы, представляет несомненный интерес для современного высокотехнологичного производства, поскольку позволяет формировать из полученных спеканием заготовок полуфабрикаты или готовые изделия с различными геометрическими формами.

При этом традиционные методы, прежде всего, механическая, в частности, абразивная обработка [1], другие виды резания имеют ограниченное применение, что обусловлено особенностями структурного состояния и физико-механическими свойствами материалов обрабатываемых заготовок. Особенно сложной является обработка изделий из слоистых композиций, в которых имеется опасность разрыва адгезионных связей в плоскости «основа-поверхностный слой».

В наших предыдущих работах [2, 3] было показано, что струйные методы обработки, прежде всего, струйно-абразивный, а также лазерно-струйный, имеют широкие перспективы в промышленном использовании при разрезании плоских заготовок.

В работе [4] нами также показано, что гибридные методы обработки, базирующиеся на сочетании различных способов воздействия энергетических или иных потоков на материал, позволяют существенно снизить трудозатраты на изготовление, повысить качество обработки. В то же время рассмотрение готового изделия с точки зрения его полезных функций позволяет усовершенствовать метод и научно обосновать наиболее рациональные способы воздействия на заготовку для достижения максимального уровня качества.

Решение этих проблем видится в использовании инновационного подхода к разработке гибридных методов обработки, сущность которого заключается в обеспечении полезных функций изделия на основе морфологического анализа вариантов сочетания силовых или энергетических потоков, формирующих гибридный процесс обработки.

Функциональный подход к разработке и созданию новых машин, предметов и сложных технических систем изучался многими исследователями, в частности Е.И. Галибардовым [5]. Он констатирует что любой материальный объект представляет собой определенную совокупность (матрицу) функций, среди которых можно выделить функции полезные, вредные и нейтральные. В отличие от подхода материального, функциональный исходит из того, что изделие производится для реализации ряда функций, которые обеспечиваются соответствующими материальными носителями (наиболее дешевыми или технологические переходы с которыми являются наименее затратными).

Поскольку в готовом изделии присутствуют все виды функций (как полезные, так и бесполезные и вредные), технологические переходы должны быть ориентированы так, чтобы вредные функции были ослаблены, а полезные, в свою очередь, были получены за минимальное количество переходов. Тогда перспективным можно считать такой технологический процесс (ТП), на переходах которого одновременно с формированием полезных функций происходило ослабление или полная ликвидация функций вредных.

Анализ типовых изделий машиностроения с позиций функционального подхода показывает, что практически всегда формирование конкретной полезной потребительской функции  $F_p$  будет связано с проявлением нейтральных  $F_n$  и вредных  $F_v$  функций. Тогда идеальным с точки зрения эксплуатации является изделие, несущее только полезные в определенных конкретных условиях функции:

$$F_p = F_{pz}, F_v = 0, F_n \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $F_{pz}$  – полезные свойства изделия, и имеющие следующую матрицу потребительских свойств:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{pi} + \sum_{j=1}^m F_{nj} + \sum_{k=1}^p F_{vk}. \quad (2)$$

Следовательно, уравнение ограничений (1) и оптимизации (2) позволяет на основе морфологического анализа подобрать наиболее рациональные материальные носители функций, а от них перейти к материальным носителям ТП, формирующего эти функции.

Пусть создаваемое изделие реализует некоторую совокупность полезных функций  $F_1 \dots F_l$ . Для их обеспечения должны быть сформированы элементы состояния заготовки  $E_{ki}$  таким образом, что  $F_i = C_{ki} = C_{pi} W_{pj} = \sum E_{ki} W_{pj}$ .

Так как формирование заданных функций представляется многовариантной задачей, полученные на основе морфологического анализа логические соотношения могут упрощены за известными правилами Булевой алгебры, при условии выполнения ряда ограничений. При этом дифференциация или гибридизация операций могут нести новые эффекты, которые необходимо учитывать соответствующими весовыми коэффициентами.

Применение такого подхода позволяет выявить рациональную последовательность выполнения переходов ТП, находить условия и возникновения вредных функций и исключать их (или инвертировать), а также определять возможность гибридизации процесса для выполнения условия (1).

Формирование свойств изделия осуществляется вследствие выполнения ряда технологических переходов, при котором происходит полное или частичное изменение начальных свойств. Технологические превращения заготовки в изделие достигаются целенаправленными совокупными технологическими влияниями  $W_{ij}(t_k)$  материального  $S_o(t_k)$ , энергетического  $E_o(t_k)$  и информационного  $I_o(t_k)$  типов, что дает возможность записать:

$$W_{ij}(t_k) = S_o(t_k) \cup E_o(t_k) \cup I_o(t_k).$$

Рассмотрим применение данного подхода для создания гибридных процессов в обработке алмазосодержащих инструментальных изделиях. Такие изделия достаточно просты, количество элементов  $E_i$ , определяющих функции  $F_j$  последних невелико и, как правило, представляет собой несколько поверхностей, образующих режущий клин и плоскость крепления пластинки.

Традиционно данные изделия представляют собой пластины правильной геометрической формы, выполненные однородными или слоистыми в зависимости от их назначения. В случае, если специальный инструмент требует применения форм пластин, отличающихся от стандартных (нормализованных), финишная обработка ведется преимущественно абразивным инструментом (АО). Однако результаты, полученные нами при использовании струи жидкости высокого давления, показывают, что более перспективным является процесс гидроабразивного резания. Его применение ведет к тому, что появляется возможность непосредственно формировать требуемую криволинейную поверхность, однако скорость внедрения площадки разрушения при увеличении глубины резания резко сокращается, а искривление струи как «нежесткого» инструмента – увеличивается.

Высокая прочность поликристаллических сверхтвердых материалов (ПСТМ) и алмазосодержащих элементов (АСЭ) обуславливает то, что движущийся поток абразивных зерен практически не оказывает влияния на обрабатываемый материал, а его разрезание с приемлемой для производственных условий скоростью не наблюдается.

Получение начальной бороздки и образование прореза или канала ведет к искривлению струи и ее уходу от теоретической оси в сторону, противоположную движению подачи. Этому способствует выборность разрушения, обусловленная «нежесткостью» струи, вследствие чего происходит формирование специфических площадок разрушения, положение и размер которых определяет форму фронта гидрорезания и отклонение струи на угол  $\alpha$ , величина которого обуславливается соотношением скорости  $v_z$  проникновения струи в обрабатываемый материал и скорости подачи  $s$ , вследствие чего возникает волнистость, отклонение от перпендикулярности кромок (рис. 1).



Рис.1. Дефекты поверхности на ПСТМ и ТС

Способность струи избирательно огибать препятствия ведет к тому, что неоднородность самого обрабатываемого материала, силовой схемы может провоцировать наличие как бугристых элементов поверхности, так и поверхностные сколы.

Таким образом, свойства процесса ГАР с точки зрения функционального похода можно представить элементами табл. 1. При этом способность струи разрушать преграду с образованием вертикальных кромок может рассматриваться полезной функцией только для ограниченного круга материалов.

Таблица 1 - Обеспечение функции изделия путем создания элемента  $E_i$  технологическим воздействием  $W_{ij}(t_k)$  при ГАР

Обрабатываемый материал	Функции $F^*$			
	Полезные $F_{pi}$	Вредные $F_{vk}$		Нейтральные $F_{ni}$
	Получение перпендикулярной кромки изделия $h$ , mm	Волнистость $\delta$ , $\mu\text{m}$	Скол поверхности	Нагрев заготовки
ТС	$F_{pi}$ - зависит от режимов резания	$F_{vk}$ - зависит от режимов резания	Минимальный	До 50-60 <sup>0</sup> С
ПСТМ	Слабая	Высокая	Полный	До 50-60 <sup>0</sup> С
ПКА	Отсутствует	Отсутствует	Незначительный	До 50-75 <sup>0</sup> С

Тогда  $W_{it}(t_k) = W_{i^{Fp1}}(t_k) \cap W_{i^{Fv1}}(t_k)$  при условии, что  $F_{v2}$  и  $F_{n1}$  можно пренебречь, а проявление полезных и вредных свойств (функций) происходит одновременно. Соответствующие преобразования в виде результата процесса, например, глубины  $h$  (линейной величины элемента поверхности) для ТС могут представлять собой регрессионные уравнения в виде, представленном ниже:

$$h|_{W^{Fp}} = b_0 + b_1 s_k + b_2 M_a; \delta|_{W^{Fv}} = b_0 + b_1 s_k + b_2 h_m, \quad (3)$$

где  $M_a$  – массовый расход абразивных зерен,  $h_m$  – толщина обрабатываемого материала. Для других материалов  $h|_{W^{Fp}} = 0; \delta|_{W^{Fv}} = 0$ .

Более широкие возможности несет комбинированная обработка материала лазерным пучком или лазерными излучением, направляемым струей жидкости (Water Jet Guided Laser (WJGL)). В этом случае варианты выполнения обработки как лазерное резание с охлаждением (ЛРО), так и лазерно-струйное резание (ЛСР). В этом случае усложняются также и уравнения (3).

Особенностью двухслойных АТП является то, что по сечению на получаемой поверхности меняется не только структура материала, его физико-механические свойства, но и его обрабатываемость тем или иным способом. Для анализируемых пластинок в виде ТС с ПКА-слоем особенностью есть то, что ПКА практически не обрабатывается ГАР, в то время как поддается ЛРО и ЛСР. Основа пластинки – ТС обрабатывается ГАР с высокой производительностью.

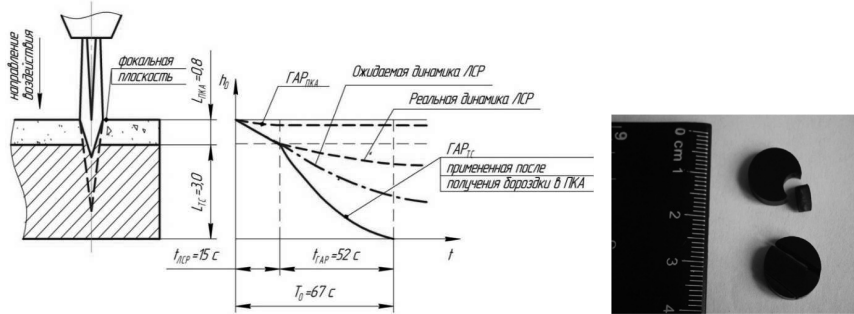


Рис.2. Гибридизация процесса резания двухслойной АТП

В этом случае формирование поверхности как элемента изделия может быть представлено в виде логического умножения преобразований  $W_{i1}(t_k)$  и  $W_{i2}(t_k)$  и описано выражением

$$W_p(t_k) = W_{i^{Fp1}}(t_k) \cap W_{i^{Fv1}}(t_k) \cap W_{i^{Fv2}}(t_k) \cap W_{i^{n1}}(t_k) \cdot W_{i^{Fp1}}(t_k) \cap W_{i^{Fv1}}(t_k)$$

Таким образом, с учетом условия обеспечения начального высококачественного формирования лунки разрушения в ПКА-слое гибридный процесс должен представлять собой совокупность процессов начального ЛСР до момента полного прорезания ПКА-слоя и образования лунки в ТС, с дальнейшим прорезанием пластинки ГАР (рис. 2).

Следовательно, применение функционального подхода позволяет выявить рациональную последовательность выполнения переходов ТП, находить оптимальные условия и места возникновения вредных функций, исключать их (или инвертировать), а также определять возможность гибридизации процесса.

## On application of a functional-oriented approach in the development of hybrid processes for the processing of composite materials

Salenko A.F., Klimenko S.A., Shchetinin V.T., Lashko Ye.E., Kovalenko S.V., Mohamed R.F. Budar

*Annotation:* Composite materials used in modern machine building, characterized not only by a combination of unique properties, which determines the scope of their use, but also have in the vast majority of low processing. The tendency to destruction, high abrasiveness, micronutrition of cohesive and adhesion characterizes the active search for methods and methods of controlled influence for the purpose of forming. It is proposed to use a function-oriented approach to hybridization of processing processes. Since all processes can be classified according to the type of influence, its localization, the direction of action, the phenomena of the transformation of the material body and the formation of new surfaces of division, while the surfaces formed - by type, accuracy, and functional purpose, we obtain the opportunity by setting up a single- or multicriteria optimization problem determine rational options for performing processing from the set of possible. By checking the possibility of combining individual actions and impacts on the workpiece, they determine the conditions and possibilities for hybridizing the process using the combined tool. The results of contour cutting of plates made of polycrystalline superhard materials are presented.

*Key words:* composites; hybrid processes; processing, functional approach

## О применении функционально-ориентированного подхода при разработке гибридных процессов обработки композиционных материалов

Саленко А.Ф., Клименко С.А., Щетинин В.Т., Лашко Є.Є., Коваленко С.В., Мохамед Р.Ф.Будар

*Аннотация:* Композиционные материалы, используемые в современном машиностроении, характеризуются не только совокупностью уникальных свойств, что обуславливает сферы их использования, а и имеют в большинстве низкую обрабатываемость. Склонность к деструкции, высокая абразивность, микроразрушения когезийного и адгезионного характера обуславливает активный поиск способов и методов управляемого воздействия с целью формообразования. Предлагается применять функционально-ориентированный подход к гибридации процессов резания. Поскольку все процессы можно классифицировать по виду воздействия, его локализацией, направлением действия, по явлениями изменения тела материала и образования новых поверхностей раздела, а сами поверхности - по типу, точности, функциональному назначению, получаем возможность путем постановки одно- или многокритериальной задачи оптимизации определять рациональные варианты выполнения обработки из множества возможных. Проверяя возможность совмещения отдельных действий и воздействий на заготовку, определяют условия и возможности гибридации процесса, используя комбинированный инструмент. Приведены результаты контурной резки пластин из поликристаллических сверхтвердых материалов.

*Ключевые слова:* композиты; гибридные процессы, обработка, функциональный подход

### Список літератури

1. Superhard materials. Obtaining and application: In 6 vol. / edited by N. V. Novikov. – K. : Nauk. dumka, 2003. – vol. 1. – 320 p.
2. Salenko A. F., Shchetinin V. T., Fedoteyev A. N. Improving accuracy of profile hydro-abrasive cutting of plates of hardmetals and superhard materials // J. of Superhard Mat. – 2014. – vol. 36, № 3. – P. 199–207.
3. Methods of cutting for workpieces of hardmetal and cBN-based polycrystalline superhard material / A. F. Salenko, V. T. Shchetinin, A. N. Fedoteyev et. al. // J. of Superhard Mat. – 2015. – vol. 37, № 4. – P. 271–281.
4. Klimenko S. A., Mel'niichuk Yu. A., Vstovskii G. V. Interrelation between the Structure Parameters, Mechanical Properties of Sprayed Materials and the Tool Life in Cutting Them // J. of Superhard Mat. – 2008. – vol. 30, № 2. – P. 115–121.
5. Fedoteyev A., Fedoteyeva L. The prospects of carbolloies waste utilization as wearproof coverings // Izvestiia na Tekhnicheskiiia universitet Gabrovo. – 2010. – V. 39. – P. 30–33.
6. Kholodnyi V., Salenko, O. (2016) The water jet guided laser method in punching honeycomb cores for aerospace sandwich panels, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1, № 5(79), pp. 19–30. DOI 10.15587/1729-4061.2016.59870
7. Synergy and fractals in Material Science / V. S. Ivanova, A. S. Balankin, I. Zh. Bunin, A. A. Oksogoev. – M.: Nauka, 1994. – 384 p.
8. Simulation of Laser Cutting / W. Schulz, M. Niessen, U. Eppelt, K. Kowalick // The Theory of Laser: Mat. Proces. – John Dowden. Springer pb., 2009. – № 119. – P. 21–69.
9. Gindin P. D. A mathematical model of thermal cleaving of brittle anisotropic materials // Surface. – 2010. – № 1. – P. 14–18.
10. French M. J. Design principles applied to structural functions of machine components // J. of Eng. Design. – 1992. – 3 (3). – P. 229–241.
11. About some results of processing SiC-microarrays by Hydroabrasive Precision Jet / O. Salenko, G. Gabuzyan, Y. Myronov, V. Nikitin // J. of Mech. Eng. NTUU «Kyiv Polytechnic Institute». – 2013. – P. 178–184.