

УДК 621.941.1

Структурная оптимизация конструкций сборных твердосплавных инструментов с режущими кромками фасонного профиля

П.А. Чаевский¹, С.В. Грубый²¹ ООО «Бизнес Инжиниринг»² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Structural optimization in designing the prefabricated carbide tools with the cutting edge of a shaped profile

P.A. Chaevskiy¹, S.V. Grubiy²¹ Business Engineering LLC² Bauman Moscow State Technical University

Предложена методика структурной оптимизации конструкций сборных твердосплавных инструментов с режущими кромками фасонного профиля, позволяющая сократить производственные затраты путем унификации номенклатуры заготовок, державок и корпусов специализированных режущих инструментов с учетом производственных возможностей широкого спектра машиностроительных предприятий. Рассмотрены критерии оптимизации и приведены количественные оценки критериев. Разработаны конструкции сборных инструментов с режущими кромками фасонного профиля с использованием унифицированных заготовок сменных многогранных пластин.

EDN: FYZZVY, <https://elibrary/fyzzvy>

Ключевые слова: структурная оптимизация, сборный инструмент, сменная многогранная пластина, аддитивный критерий, фасонный профиль, фасонный инструмент

The paper proposes a method for structural optimization in designing the assembled carbide tools with the shaped cutting edges making it possible to reduce production costs by unifying the range of workpieces, holders and bodies of the special and specialized cutting tools, taking into account production capabilities of a wide range of the machine-engineering enterprises. It considers the optimization criteria and provides the criteria quantitative assessment. Designs of the prefabricated tools with the shaped cutting edges using the standardized workpieces of the replaceable multi-faceted inserts are developed.

EDN: FYZZVY, <https://elibrary/fyzzvy>

Keywords: structural optimization, assembled tool, replaceable multi-faceted insert, additive criterion, shaped profile, shaped tool

Производственные затраты можно снизить унификацией используемой номенклатуры и повышением доли специальных режущих инструментов, выпускаемых предприятием для собственных нужд. Следует отметить, что проекты по созданию независимого самодостаточного инструментального производства в

рамках машиностроительного предприятия в большинстве случаев экономически неэффективны.

Комплексное инструментальное обеспечение машиностроительного предприятия подразумевает снабжение производства режущими инструментами и приспособлениями разного типа.

Себестоимость изготовления стандартного режущего инструмента на машиностроительном предприятии будет существенно превышать его рыночную стоимость вследствие относительно малых партий, простоев оборудования по причине переналадок и перепрограммирования, больших накладных расходов.

Вместе с тем увеличение доли изготовления специализированных инструментов, в том числе с режущими кромками фасонного профиля, может привести к существенному экономическому эффекту на основе комплексной оптимизации конструкций и технологии.

Цель статьи — разработка методики структурной оптимизации конструкций сборных твердосплавных инструментов с режущими кромками фасонного профиля и режимных параметров обработки.

По результатам проведенных исследований разработана модель структурной оптимизации и конструкции сборных инструментов с режущими кромками фасонного профиля.

Общая цель структурной оптимизации заключается в определении оптимальной структуры технологического процесса, что включает в себя выбор оптимального технологического маршрута, операции, перехода, вида и методов изготовления заготовки, способов базирования, оборудования, приспособлений и инструмента, отвечающих выбранным критериям на каждом этапе обработки.

При структурной оптимизации технологического процесса целесообразно выделять его организационные элементарные части — операции, позиции и переходы. Существуют три уровня структурной оптимизации. С первым связан выбор оборудования, со вторым — приспособлений, с третьим — инструментов [1–9]. Разрабатывают системы автоматизированного выбора инструментов, прежде всего, для станков с ЧПУ [10]. Вместе с тем вопросы структурной оптимизации конструкций специальных сборных инструментов не изучены.

Структурную оптимизацию конструкций сборных инструментов, являющуюся многокритериальной задачей, формулируют с учетом многокритериального подхода [11–14].

Для проведения структурной оптимизации использованы следующие исходные данные:

- типы инструментов (сборные резцы, фрезы) и габаритные размеры их фасонных профилей;
- профили, предназначенные для унификации;

- характерные размеры инструментов (сечение державки, посадочный диаметр, диаметр хвостовика);

- геометрические ограничения, накладываемые обрабатываемой заготовкой (минимальный диаметр расточки, глубина паза, допустимый угол в плане инструмента, допустимый диаметр фрезы)

- базовая конструкция сборного инструмента при ее наличии.

Для упрощения геометрического анализа предложено вписывать фасонный профиль в габаритные размеры прямоугольника $b \times t$. Например, для частного случая фасонного резца этими параметрами являются ширина резания b и глубина профиля t .

Для структурной оптимизации выбраны следующие параметры:

- форма заготовки твердосплавной сменной многогранной пластины (СМП), регламентируемая государственным стандартом [15], либо рекомендациями инструментальных предприятий, производящих заготовки;

- размеры твердосплавной заготовки, связанные с формой СМП;

- расположение СМП по характеру установки относительно обрабатываемой детали (радиальное, тангенциальное);

- установочные углы СМП в державке (корпусе).

Основные размеры широко применяемых форм СМП приведены в табл. 1.

Установочные углы определяют положение СМП относительно корпуса или державки. На рис. 1 приведены схемы, отражающие влияние установочного угла $\gamma_{уст}$ для тангенциальной пластины расточного резца на минимально допустимый диаметр растачиваемого отверстия D_{min} . При одинаковом диаметре вписанной окружности СМП L_c и разных установочных углах минимально допустимые диаметры расточки различаются:

$$D_{min1} > D_{min2} > D_{min3}.$$

Следует отметить, что установочные углы определяют положение СМП в пространстве. По отношению к корпусу режущая пластина инструмента может быть повернута одновременно относительно трех осей координат.

К ограничениям структурной оптимизации относятся габаритные размеры фасонного профиля, геометрические размеры обрабатываемой

Таблица 1

Основные размеры форм СМП

Форма СМП	Эскиз	Размеры СМП	l	s	d	d_1	d_2
CN...		0903	9,70	3,18	9,525	4,4	6,00
		1204	12,70	4,76	12,700	5,5	7,50
		1606	16,10	6,35	15,875	5,5	7,50
		1906	19,30	6,35	19,050	6,5	9,00
SN...		0903	9,53	3,18	9,525	4,4	6,00
		1204	12,70	4,76	12,700	5,5	7,50
		1504	15,87	4,76	15,875	5,5	7,50
		1506	15,87	6,35	15,875	5,5	7,50
		1906	19,05	6,35	19,050	6,5	9,00
		2507	25,40	7,94	25,400	8,6	12,00
TN...		1103	11,00	3,18	6,350	2,8	3,75
		1603	16,5	3,18	9,525	4,4	6,00
		1604	16,5	4,76	9,525	4,4	6,00
		2204	22	4,76	12,700	5,5	7,50
		2706	27,5	6,35	15,875	5,5	7,50

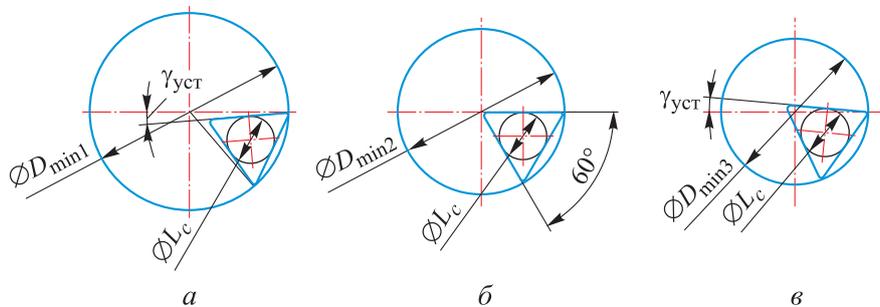


Рис. 1. Схемы, отражающие влияние установочного угла на диаметр растачиваемого отверстия:

$a - \gamma_{уст} > 0$; $b - \gamma_{уст} = 0$; $v - \gamma_{уст} < 0$

заготовки и номинальные значения посадочных размеров.

Габаритные размеры фасонного профиля влияют на размеры твердосплавной заготовки СМП. Требуемые габаритные размеры фасонного профиля должны вписываться в форму и размеры СМП с припуском не менее 0,1 мм на каждую сторону. Отмеченное требование обусловлено необходимостью устранения наружного дефектного слоя твердосплавной заготовки, который появляется после спекания.

Форма и размеры обрабатываемой детали могут являться ограничением по геометрической

траектории инструмента. Например, минимально допустимый диаметр расточки, отсутствие возможности вывода инструмента после окончания прохода, близость конструктивных элементов детали к державке, корпусу или шпинделю при обработке.

Ограничения конструктивных размеров, таких как посадочный диаметр, размеры сечения державок и диаметр хвостовика, необходимо учитывать при разработке конструкций.

Для структурной оптимизации предложены следующие критерии:

- число вершин (режущих кромок) СМП z ;

- параметр компактности K_z ;
- параметр объемной компактности K_c ;
- параметр съема твердого сплава при изготовлении T_v ;
- масса твердосплавной заготовки СМП m ;
- параметр унификации заготовок СМП K_y .

Выбор критериев структурной оптимизации обоснован общими эксплуатационными показателями режущих инструментов. В частности, с увеличением числа вершин (числа режущих кромок) повышается суммарная стойкость СМП.

Параметр компактности, применяемый для фрез, определяется отношением числа зубьев Z_f к рабочему диаметру фрезы D :

$$K_z = Z_f / D. \quad (1)$$

Чем больше параметр компактности, тем выше производительность фрезерования.

Параметр объемной компактности, характеризующий эффективность твердого сплава для СМП, определяется выражением

$$K_c = z / V, \quad (2)$$

где V — объем заготовки СМП.

Трудоемкость изготовления СМП — один из основных факторов, влияющих на ее конечную стоимость. Основную долю трудоемкости составляет шлифование. Так как предприятия и инструментальные производства имеют разный станочный парк, оценка трудоемкости по времени шлифования является нецелесообразной.

Для сравнения и выбора форм СМП предложен параметр съема твердого сплава при изготовлении, который учитывает объем сошлифованного твердого сплава:

$$T_v = \frac{z}{V - V_1}, \quad (3)$$

где V_1 — объем СМП.

Стоимость заготовки СМП пропорциональна ее массе. Чем больше заготовка СМП по размерам, тем больше ее масса, стоимость и количество сырья для ее изготовления. Масса твердосплавной заготовки m позволяет объективно оценивать экономическую перспективу конкретного варианта конструкции инструмента на этапе проектирования.

Унифицированную по форме заготовку СМП следует использовать для изготовления всех или нескольких фасонных инструментов, необходимых предприятию. Применение одной унифицированной заготовки для разных ин-

струментов позволяет экономить на переделе пресс-форм и снижать себестоимость путем увеличения серийности заготовок. Определить форму и размер унифицированной заготовки можно последовательной оценкой габаритных размеров требуемых фасонных профилей.

Параметр унификации определяется отношением

$$K_y = \frac{n_y}{n_o}, \quad (4)$$

где n_y — число инструментов, которые можно изготовить из выбранной заготовки по форме и размерам заготовки; n_o — общее число инструментов для конкретного производства.

В некоторых частных случаях, когда параметр унификации крайне важен, его можно применять как ограничение: если форма и размеры пластины не удовлетворяют хотя бы одному из требуемых к изготовлению профилей, то рассматриваемый вариант заготовки СМП исключают из рассмотрения.

Все критерии структурной оптимизации имеют численные значения, что позволяет проводить оптимизацию разными методами. Самыми эффективными методами оптимизации выбраны методы аддитивного критерия [16] и сравнением нечетких множеств [17, 18].

Оптимизацию сравнением нечетких множеств применяют при отсутствии четких приоритетов по критериям оценки. Так как приоритетов нет, оценки критериев принимают равнозначными.

Для практической реализации разработан алгоритм оптимизации сравнением нечетких множеств, включающих в себя следующие шаги.

Шаг 1. Проверка возможных вариантов заготовок на геометрические ограничения с учетом параметра унификации заготовок. Рассмотрены все формы и размеры СМП, приведенные в табл. 1. Расположение СМП в державке (корпусе) может быть тангенциальным или радиальным, тогда максимальное число возможных вариантов равно тридцати.

Например, для тангенциально установленных пластин с нулевым установочным углом толщина заготовки должна быть больше или равна ширине профиля:

$$S \geq b + 0,2,$$

где 0,2 мм — общий припуск на шлифование баз.

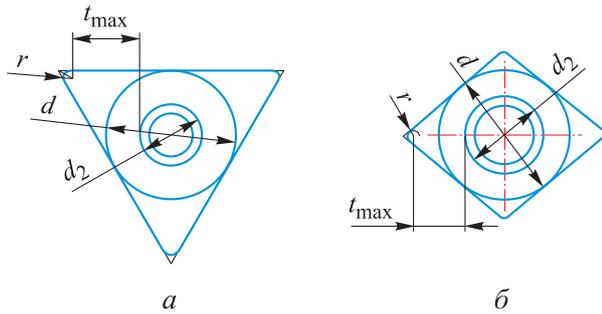


Рис. 2. Схема расчета максимальной глубины резания для СМП формы TNMA (а) и CNMA (б)

Согласно схеме расчета, приведенной на рис. 2, а, максимальная глубина резания для треугольной тангенциально установленной пластины формы TNMA

$$t_{\max} \leq \frac{\sqrt{3}}{2}d - \frac{d_2}{2} - 2r \cos 30^\circ.$$

Максимальная глубина резания для ромбической тангенциально установленной пластины формы CNMA (рис. 2, б)

$$t_{\max} \leq d\sqrt{1 - \cos^2 50^\circ} - \frac{d_2}{2} - \frac{r}{\sin 40^\circ}.$$

Для нескольких профилей получаем системы неравенств

$$\begin{cases} S \geq b_1 + 0,2; \\ \dots \\ S \geq b_n + 0,2; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} t_{\max} \geq t_1; \\ \dots \\ t_{\max} \geq t_n. \end{cases} \quad (6)$$

Шаг 2. Создание массива конструкций инструментов. Варианты заготовок СМП, которые прошли проверку по неравенствам (5) и (6), образуют массив возможных конструкций инструментов.

Шаг 3. Расчет критериев для каждой конструкции. Частный вариант конструкции задают нечетким множеством, где рассмотренные критерии являются элементом множества. Например, вариант конструкции с заготовкой CNMA0903 и тангенциальным расположением СМП имеет значения критериев, которые составляют нечеткое множество

$$L_{k_{\text{танг}}} = \{z, K_z, K_c, T_v, m, K_y\}.$$

(Здесь и далее индекс «С» соответствуют форме пластины CNMA, а индекс «танг» — тангенти-

альному расположению СМП.) Значения критериев рассчитывают по выражениям, приведенным выше.

Шаг 4. Поиск универсального множества. Для непосредственной оценки каждого частного множества (варианта конструкции) требуется дополнительное универсальное множество L_k , элементами которого являются лучшие из возможных по каждому критерию для рассматриваемого профиля:

$$L_k = \{\max z, \max K_z, \max K_c, \max T_v, \min m, \max K_y\}. \quad (7)$$

Таким образом, получаем множество с наилучшими из всех возможных характеристик, которое описывает идеальную конструкцию. Наиболее близкий вариант к идеальному (7) будет лучшим.

Для количественного сравнения вариантов конструкций рекомендовано использовать положения теории нечетких множеств. Для этого выполнен расчет степеней принадлежности для каждого множества по следующим формулам:

$$\mu_i(Z_i) = \frac{Z_i}{\max z}; \quad \mu_i(K_{zi}) = \frac{K_{zi}}{\max K_z};$$

$$\mu_i(K_{ci}) = \frac{K_{ci}}{\max K_c}; \quad \mu_i(T_{vi}) = \frac{T_{vi}}{\max T_v};$$

$$\mu_i(m_i) = \frac{\min m}{m_i}; \quad \mu_i(K_{yi}) = \frac{K_{yi}}{\max K_y}.$$

Так как универсальное множество L_k (7) является четким, для него степени принадлежности равны единице:

$$\mu_{L_k}(\max z) = 1; \quad \mu_{L_k}(\max K_z) = 1;$$

$$\mu_{L_k}(\max K_c) = 1; \quad \mu_{L_k}(\max T_v) = 1;$$

$$\mu_{L_k}(\min m) = 1; \quad \mu_{L_k}(\max K_y) = 1.$$

Количественная оценка варианта конструкции определена мерой нечеткости для каждого множества, т. е. расстоянием этого множества до ближайшего четкого. Таким четким множеством является универсальное множество L_k (7). Мера нечеткости множества в линейной метрике определяется выражением

$$D(L_i) = |\mu_i(Z_i) - \mu_{L_k}(\max z)| + |\mu_i(K_{zi}) - \mu_{L_k}(\max K_z)| + |\mu_i(K_{ci}) - \mu_{L_k}(\max K_c)| + |\mu_i(T_{vi}) - \mu_{L_k}(\max T_v)| + |\mu_i(m_i) - \mu_{L_k}(\min m)| + |\mu_i(K_{yi}) - \mu_{L_k}(\max K_y)|. \quad (8)$$

Тогда оптимальным вариантом конструкции будет являться множество с наименьшей мерой нечеткости. В общем виде для нескольких профилей имеем меры нечеткости

$$\left\{ \begin{aligned} &D(L_1) = \min [D(L_{1C_{танг09}}), D(L_{1C_{рад09}}), D(L_{1S_{танг09}}), \\ &D(L_{1S_{рад09}}), D(L_{1T_{танг11}}), D(L_{1T_{рад11}}), \dots, \\ &D(L_{1T_{танг27}})]; \\ &\dots \\ &D(L_k) = \min [D(L_{kC_{танг09}}), D(L_{kC_{рад09}}), D(L_{kS_{танг09}}), \\ &D(L_{kS_{рад09}}), D(L_{kT_{танг11}}), D(L_{kT_{рад11}}), \dots, \\ &D(L_{kT_{танг27}})]. \end{aligned} \right.$$

Здесь и далее индексы «S» и «T» соответствуют форме пластин SNMA и TNMA, индекс «рад» — радиальному расположению СМП, а индексы «09», «11» и «27» — размерам СМП.

Оптимальный вариант конструкции будет соответствовать варианту с минимальным значением меры нечеткости.

Предложенная методика количественной оценки варианта конструкции сборного инструмента позволяет формализовать оптимизацию с помощью аддитивного критерия. В общем виде аддитивный критерий

$$A(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{f_i}{f_{i0}} \rightarrow \max, \quad (9)$$

где α_i — весовой коэффициент; $\sum \alpha_i = 1$; f_i и f_{i0} — значение критерия рассматриваемого и базового варианта.

Все критерии структурной оптимизации имеют численные значения, что позволяет проводить оптимизацию аддитивным критерием. Стандартным подходом является назначение весовых коэффициентов как экспертной оценки, что не позволяет однозначно рассчитать критерий (9).

Будем искать решение по весовым коэффициентам с использованием рассмотренных положений нечетких множеств, для чего рассчитаем меры нечеткости для каждого множества, определяющего вариант конструкции. Находим множества:

- с наименьшей мерой нечеткости

$$L_{i \min} \{z_{i \min}, K_{zi \min}, K_{ci \min}, T_{vi \min}, m_{i \min}, K_{yi \min}\};$$

- с наибольшей мерой нечеткости

$$L_{i \max} \{z_{i \max}, K_{zi \max}, K_{ci \max}, T_{vi \max}, m_{i \max}, K_{yi \max}\}.$$

Множеству с наименьшей мерой нечеткости соответствует лучший вариант, а с наибольшей мерой нечеткости — худший.

Для поиска значений весовых коэффициентов принимаем за базовый вариант с наибольшей мерой нечеткости. Тогда аддитивный критерий (9) на примере фрезы приобретает вид

$$A(L_{i \min}) = \alpha_1 \frac{z_{i \min}}{z_{i \max}} + \alpha_2 \frac{K_{zi \min}}{K_{zi \max}} + \alpha_3 \frac{K_{ci \min}}{K_{ci \max}} + \alpha_4 \frac{T_{vi \min}}{T_{vi \max}} + \alpha_5 \frac{m_{i \max}}{m_{i \min}} + \alpha_6 \frac{K_{yi \min}}{K_{yi \max}} \rightarrow \max. \quad (10)$$

Для каждого варианта конструкции также должно быть выполнено условие, что вариант с наименьшей мерой нечеткости остается лучшим:

$$\begin{aligned} A_i &= \alpha_1 \frac{z_i}{z_{i \min}} + \alpha_2 \frac{K_{zi}}{K_{zi \min}} + \alpha_3 \frac{K_{ci}}{K_{ci \min}} + \\ &+ \alpha_4 \frac{T_{vi}}{T_{vi \min}} + \alpha_5 \frac{m_{i \min}}{m_i} + \alpha_6 \frac{K_{yi}}{K_{yi \min}} < 1; \quad (11) \\ \sum \alpha_i &= 1; \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1. \end{aligned}$$

Тогда методом перебора возможных значений α_i получаем единственный набор значений весовых коэффициентов, при которых аддитивный критерий (10) с базовым вариантом значений критериев $L_{i \max}$ принимает максимальное значение $A(L_{i \min}) \rightarrow \max$.

Разработанная методика и расчетные алгоритмы реализованы при оптимизации конструкции канавочного резца и прорезной фрезы. Исходные фасонные профили показаны на рис. 3. Габаритные размеры профилей: для резца $b_1 = 2,33$ и $t_1 = 3,7$ мм, для фрезы $b_2 = 2,75$ и $t_2 = 5$ мм.

Выполнена проверка возможных вариантов заготовок твердосплавных СМП. В табл. 2 и 3 приведены примеры отсева возможных вариантов для оптимизируемого и ограничивающе-

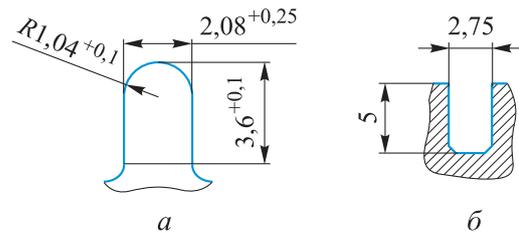


Рис. 3. Схемы исходных фасонных профилей для оптимизации резца (а) и фрезы (б)

Таблица 2

Пример отсева возможных вариантов для оптимизируемого профиля реза

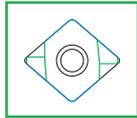
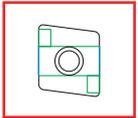
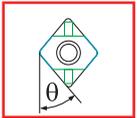
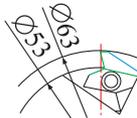
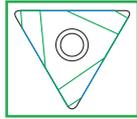
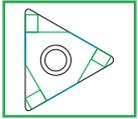
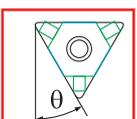
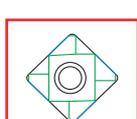
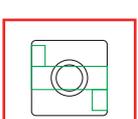
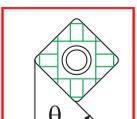
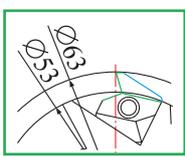
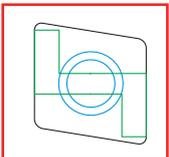
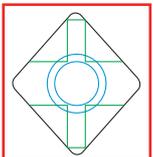
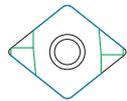
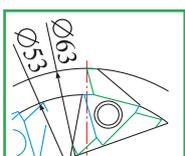
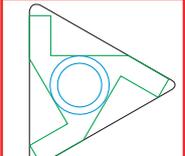
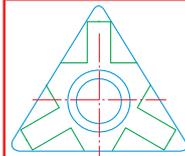
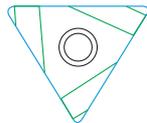
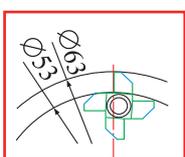
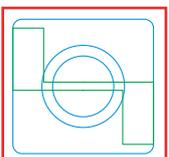
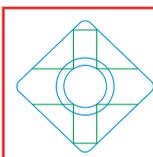
Возможные формы заготовок	Профиль для реза			Ограничивающий профиль для фрезы
	Тангенциально	Радиально	Радиально (с установочным углом)	Тангенциально
CNMA 120408				
TNMA 220408				
SNMA 120408				

Таблица 3

Пример отсева возможных вариантов для ограничивающего профиля реза

Возможные формы заготовок	Профиль для фрезы			Ограничивающий профиль для реза
	Тангенциально	Радиально	Радиально (с установочным углом)	Тангенциально
CNMA 120408				
TNMA 220408				
SNMA 120408				

го профилей реза. Красным цветом отмечены отброшенные варианты.

Все возможные варианты СМП, прошедшие отбор по ширине и глубине, формируют массив конструкций инструментов, эскизы которых приведены в табл. 4.

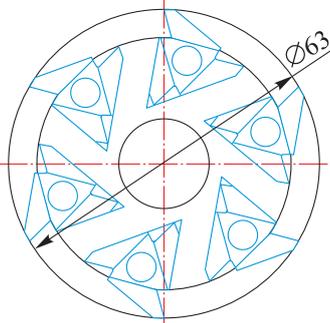
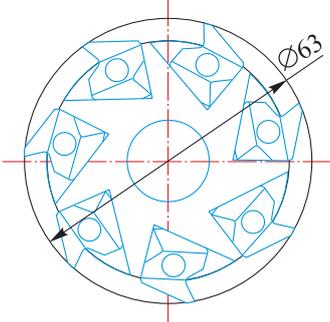
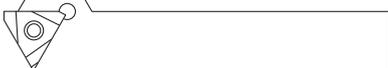
Конструкции инструментов, показанные в табл. 4, количественно описаны с помощью не-

четкого множества, где каждый из критериев является его элементом. Критерии рассчитывают по выражениям (1)–(4) и дополняют данными по заготовке.

При рассматриваемых условиях получены следующие множества для фрезы $L_{фр}$ и реза $L_{рез}$ в формате $L_{фр} = \{z, K_z, K_c, T_v, m, K_y\}$ и $L_{рез} = \{z, K_c, T_v, m, K_y\}$:

Таблица 4

Варианты конструкций

Вариант конструкции с заготовкой СМП разной формы	Эскизы
Фреза с пластиной TNMA	
Фреза с пластиной CNMA	
Резец TNMA (тангенциально)	
Резец TNMA (радиально)	
Резец CNMA (тангенциально)	

$$L_{фр T_{танг}} = \{18; 0,095; 0,0045; 0,02; 13,66; 1\};$$

$$L_{фр C} = \{14; 0,11; 0,004; 0,014; 10,42; 1\};$$

$$L_{рез T_{танг}} = \{3; 0,0033; 0,0147; 13,66; 1\};$$

$$L_{рез T_{рад}} = \{3; 0,0033; 0,0115; 13,66; 1\};$$

$$L_{рез C_{танг}} = \{2; 0,0029; 0,0177; 10,42; 1\}.$$

Согласно формуле (7), универсальные множества

$$L_k_{фр} = \{18; 0,11; 0,0045; 0,02; 10,42; 1\};$$

$$L_k_{рез} = \{3; 0,0033; 0,0177; 10,42; 1\}.$$

Для каждого множества получены степени принадлежности

$$\mu_{фр T} = \{1; 0,864; 1; 1; 0,763; 1\};$$

$$\mu_{фр C} = \{0,778; 1; 0,889; 0,7; 1; 1\};$$

$$\mu_{рез T_{танг}} = \{1; 1; 0,831; 0,763; 1\};$$

$$\mu_{рез T_{рад}} = \{1; 1; 0,649; 0,763; 1\};$$

$$\mu_{рез C_{танг}} = \{0,667; 0,878; 1; 1; 1\}.$$

По формуле (8) рассчитаны меры нечеткости

$$D(L_{фр T}) = 0,374; \quad D(L_{фр C}) = 0,633;$$

$$D(L_{рез T_{танг}}) = 0,407; \quad D(L_{рез T_{рад}}) = 0,587;$$

$$D(L_{рез C_{танг}}) = 0,455.$$

Отсюда выбираем оптимальные конструкции фрезы и резца с наименьшей мерой нечеткости:

$$D(L_{фр}) = D(L_{фр T}) = 0,374;$$

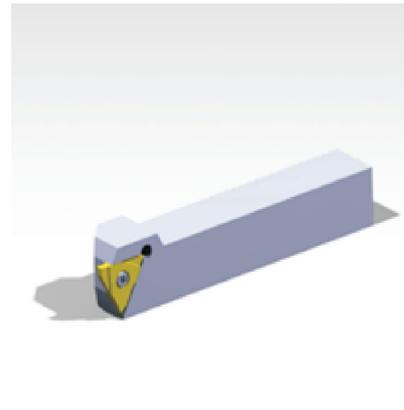
$$D(L_{рез}) = D(L_{рез T_{танг}}) = 0,407.$$

Для фрезы и резца оптимальными являются конструкции с СМП формы TNMA 220408. Модели соответствующих инструментов показаны на рис. 4.

Приведем пример расчета весовых коэффициентов для указанных конструкций. Минимальное значение меры нечеткости резца $D(L_{рез T_{танг}}) = 0,407$ соответствует конструкции с набором частных критериев $L_{рез T_{танг}} =$



а



б

Рис. 4. Модели фрезы (а) и резца (б) с СМП формы TNMA 220408

$= \{3; 0,0033; 0,0147; 13,66; 1\}$, а его максимальное значение $D(L_{рез\ T_{рад}}) = 0,587$ — конструкции с набором частных критериев $L_{рез\ T_{рад}} = \{3; 0,0033; 0,0115; 13,66; 1\}$.

По формулам (10) и (11) получаем аддитивные критерии $A(L_{imin}) = 1,083$ и $A_i = 0,989 < 1$ с набором коэффициентов $\alpha_1 = 0,2$; $\alpha_2 = 0,3$; $\alpha_3 = 0,3$; $\alpha_4 = 0,1$ и $\alpha_5 = 0,1$.

Таким образом, показано, что для сборного резца частные критерии объемной компактности и съема превалируют над остальными.

Минимальное значение меры нечеткости фрезы $D(L_{фр\ T}) = 0,374$ соответствует множеству $L_{фр\ T} = \{18; 0,095; 0,0045; 0,02; 13,66; 1\}$, а ее максимальное значение $D(L_{фр\ C}) = 0,633$ — множеству $L_{фр\ C} = \{14; 0,11; 0,004; 0,014; 10,42; 1\}$.

По формуле (10) найден аддитивный критерий $A(L_{imin}) = 1,247$ с набором весовых коэффициентов $\alpha_1 = 0,1$; $\alpha_2 = 0,1$; $\alpha_3 = 0,1$; $\alpha_4 = 0,5$; $\alpha_5 = 0,1$ и $\alpha_6 = 0,1$.

Для фрезы частный критерий съема является более значимым.

По разработанным моделям выполнены рабочие чертежи корпуса фрезы и державки, а также чертежи СМП для шлифования профиля на твердосплавных заготовках. Изготовлены опытные экземпляры сборных инструментов, которые были апробированы в производственных условиях машиностроительных предприя-

тий на операциях обработки канавок и пазов на деталях типа рубашки охлаждения и вала.

Выводы

1. Предложена методика структурной оптимизации, отличительной особенностью которой является то, что количественные критерии, характеризующие конструкцию, представлены нечеткими множествами, а оптимальной признана конструкция с наименьшей мерой нечеткости. Оптимальность конструкции подтверждена по аддитивному критерию с расчетом весовых коэффициентов и использованием набора частных критериев нечеткого множества.

2. Разработанный алгоритм структурной оптимизации учитывает критерии с численными значениями, описывающие конструктивные особенности инструмента, имеет алгоритм расчета весовых коэффициентов, что исключает субъективность экспертных оценок.

3. Предложенная методика применена для оптимизации конструкций специального сборного канавочного резца и прорезной фрезы, рекомендована для использования при разработке режущих инструментов разного вида и может быть распространена на другие объекты оптимизации.

Литература

- [1] Рыжов Э.В., Аверченков В.И. *Оптимизация технологических процессов механической обработки*. Киев, Наукова думка, 1989. 192 с.
- [2] Грубый С.В. *Математическое моделирование и оптимизация механической обработки*. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2022. 212 с.
- [3] Скуратов Д.Л., Трусов В.Н., Ласточкин Д.А. *Оптимизация технологических процессов в машиностроении*. Самара, Изд-во СГАУ, 2006. 86 с.

- [4] Селиванов С.Г., Габитова Г.Ф., Яхин А.И. и др. Каскадный метод оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП на основе использования искусственных нейронных сетей. *Вестник УГАТУ*, 2014, № 3, с. 170–174.
- [5] Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*, 2013, № 3, с. 61–65.
- [6] Кувшинский Б.Ю. Системно-структурный подход к анализу и оптимизации технологических процессов обработки резанием. *Тез. докл. конф. Теория и методика фундаментальных и прикладных научных исследований*. Екатеринбург, Аэтерна, 2021, с. 44–47.
- [7] Özdemir M., Şahinoğlu A., Rafighi M. et al. Analysis and optimisation of the cutting parameters based on machinability factors in turning AISI 4140 steel. *Can. Metall. Q.*, 2022, vol. 64, no. 4, pp. 407–417, doi: <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2058154>
- [8] Çiftçi İ., Gökçe N. Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi method. *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 201–213, doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416482>
- [9] Скуратов Д.Л., Сидоров С.Ю. Модель структурно-параметрической оптимизации технологического процесса механической обработки на стадии его проектирования. *Вестник СГАУ*, 2006, № 2-2, с. 343–346.
- [10] Аверченков В.И., Аверченков А.В., Терехов М.В. и др. *Автоматизация выбора режущего инструмента для станков с ЧПУ*. Москва, Флинта, 2011. 151 с.
- [11] Зак Ю.А. *Прикладные задачи многокритериальной оптимизации*. Москва, Экономика, 2014. 455 с.
- [12] Закураев В.В., Шивырев А.А. Многокритериальная оптимизация и управление механической обработкой на токарных станках с ЧПУ. *Вестник машиностроения*, 2001, № 4, с. 44–49.
- [13] Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев. *Наука и образование: научное издание*, 2015, № 6. URL: <http://engineering-science.ru/doc/780334.html>
- [14] Родзин С.И. *Теория принятия решений: лекции и практикум*. Таганрог, Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. 336 с.
- [15] ГОСТ 19042–80. *Пластины сменные многогранные*. Москва, Стандартинформ, 2006. 40 с.
- [16] Иванова О.В. *Математическое моделирование процессов обработки материалов*. Орел, ОГУ им. И.С. Тургенева, 2019. 29 с.
- [17] Лисицына Л.С. *Основы теории нечетких множеств*. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2020. 74 с.
- [18] Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. *Нечеткая логика и искусственные нейронные сети*. Москва, Физматлит, 2001. 224 с.

References

- [1] Ryzhov E.V., Averchenkov V.I. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki* [Optimisation of technological processes of mechanical processing]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1989. 192 p. (In Russ.).
- [2] Grubyy S.V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya mekhanicheskoy obrabotki* [Mathematical modelling and optimization of mechanical processing]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 212 (In Russ.).
- [3] Skuratov D.L., Trusov V.N., Lastochkin D.A. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii* [Optimisation of technological processes in mechanical engineering.]. Samara, Izd-vo SGAU Publ., 2006. 86 (In Russ.).
- [4] Selivanov S.G., Gabitova G.F., Yakhin A.I. et al. Cascade optimization method technological process routes in automated systems production planning with using artificial neural network. *Vestnik UGATU*, 2014, no. 3, pp. 170–174. (In Russ.).
- [5] Duyun T.A., Grinek A.V., Sakharov D.V. Modelling and optimisation of technological processes of product manufacturing using the method of dynamic programming. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov], 2013, no. 3, pp. 61–65. (In Russ.).
- [6] Kuvshinskiy B.Yu. [System-structural approach to analysis and optimisation of technological processes of machining by cutting]. *Tez. dokl. konf. Teoriya i metodika fundamentalnykh i*

- prikladnykh nauchnykh issledovaniy* [Abs. Theory and Methods of Fundamental and Applied Scientific Research Conf.]. Ekaterinburg, Aeterna Publ., 2021, pp. 44–47. (In Russ.).
- [7] Özdemir M., Şahinoğlu A., Rafighi M. et al. Analysis and optimisation of the cutting parameters based on machinability factors in turning AISI 4140 steel. *Can. Metall. Q.*, 2022, vol. 64, no. 4, pp. 407–417, doi: <https://doi.org/10.1080/00084433.2022.2058154> (in Russ.).
- [8] Çiftçi İ., Gökçe H. Optimisation of cutting tool and cutting parameters in machining of molybdenum alloys through the Taguchi method. *J. Fac. Eng. Archit. Gaz.*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 201–213, doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416482> (in Russ.).
- [9] Skuratov D.L., Sidorov S.Yu. The model of structurally-parametrical optimization of the technological process of mechanical treatment during the stage of designing. *Vestnik SGAU* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2006, no. 2-2, pp. 343–346. (In Russ.).
- [10] Averchenkov V.I., Averchenkov A.V., Terekhov M.V. et al. *Avtomatizatsiya vybora rezhushchego instrumenta dlya stankov s ChPU* [Automation of cutting tool selection for CNC machines]. Moscow, Flinta Publ., 2011. 151 p. (In Russ.).
- [11] Zak Yu.A. *Prikladnye zadachi mnogokriterialnoy optimizatsii* [Applied problems of multicriteria optimisation]. Moscow, Ekonomika Publ., 2014. 455 p. (In Russ.).
- [12] Zakuraev V.V., Shivyrev A.A. Multicriteria optimisation and control of mechanical processing on lathes with CNC. *Vestnik mashinostroeniya*, 2001, no. 4, p. 44–49. (In Russ.).
- [13] Postnikov V.M., Spiridonov S.B. Selecting methods of the weighting factors of local criteria. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2015, no. 6. URL: <http://engineering-science.ru/doc/780334.html> (in Russ.).
- [14] Rodzin S.I. *Teoriya prinyatiya resheniy: lektsii i praktikum* [Decision-making theory: lectures and practice]. Taganrog, Izd-vo TTI YuFU Publ., 2010. 336 p. (In Russ.).
- [15] GOST 19042–80. *Plastiny smennye mnogogrannnye* [State standard GOST 19042–80. Throw-away (indexable) inserts. Classification. Notation. Forms]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 40 p. (In Russ.).
- [16] Ivanova O.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki materialov* [Mathematical modelling of processes of processing of materials]. Orel, OGU im. I.S. Turgenyeva Publ., 2019. 29 p. (In Russ.).
- [17] Lisitsyna L.S. *Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv* [Fundamentals of fuzzy sets theory]. Sankt-Petersburg, Universitet ITMO Publ., 2020. 74 p. (In Russ.).
- [18] Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. *Nechetkaya logika i iskusstvennyye neyronnyye seti* [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 224 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 24.04.2024

Информация об авторах

ЧАЕВСКИЙ Павел Алексеевич — руководитель проекта. ООО «Бизнес Инжиниринг» (129626, Москва, ул. 3-я Мытищинская, д. 16, стр. 5, e-mail: pchaevskiy@mail.ru).

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Information about the authors

CHAEVSKIY Pavel Alekseevich — Project Manager. Business Engineering LLC (129626, Moscow City, 3rd Mytishchinskaya St., Bldg. 16, Block 5, e-mail: pchaevskiy@mail.ru).

GRUBYI Sergey Vitalievich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Tools and Tooling Technology Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чаевский П.А., Грубый С.В. Структурная оптимизация конструкций сборных твердосплавных инструментов с режущими кромками фасонного профиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 1, с. 50–60.

Please cite this article in English as:

Chaevskiy P.A., Grubiy S.V. Structural optimization in designing the prefabricated carbide tools with the cutting edge of a shaped profile. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 1, pp. 50–60.