

УДК 621.96

П.М. Винник, К.М. Иванов, А.С. Афанасьев

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РЕЖИМОВ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ ХОЛОДНОЙ ШТАМПОВКИ

P.M. Vinnik, K.M. Ivanov, A.S. Afanasieff

OPTIMUM PARAMETRICAL SYNTHESIS OF CONDITIONS OF DIVIDING OPERATIONS OF COLD FORMING PROCESSES

Рассмотрен подход к решению задачи оптимального параметрического синтеза процессов холодной штамповки для разделительных операций, которая сначала сведена к задаче многокритериальной оптимизации, решаемой традиционными методами. Введено понятие траектории вырубki, изучено влияние параметров вырубki на траекторию.

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ. РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. ВЫРУБКА. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ.

The modern approach to the decision of problems of optimum parametrical synthesis of processes of cold forming for dividing operations is considered. The problem of optimum parametrical synthesis at first is transformed to a multiple criteria optimization problem which is solved by traditional methods. The term of a trajectory of cutting down is defined, influence of parametres of cutting down on it is analysed.

OPTIMUM PARAMETRICAL SYNTHESIS. DIVIDING OPERATIONS. MODELLING. DIVIDING. MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION.

Решение современных задач технологической подготовки производства требует применения для анализа математических методов и программ. Методологическую основу технологической подготовки производства составляют понятия «системность» и «оптимальность». В предлагаемой статье рассмотрены задачи оптимального параметрического синтеза режимов разделительных операций холодной штамповки.

Задача параметрического синтеза состоит в определении значений параметров, наилучших в плане удовлетворения требованиям технического задания [1]. Цель данной статьи — предложить процедуру решения такой задачи применительно к разделительным операциям.

Для разработки методики оптимального параметрического синтеза режимов разделительных операций необходимо определить критерии оптимальности и вектор оптимизируемых параметров с учетом имеющихся ограничений.

Сформулируем критерии имея в виду следующие цели:

получение детали заданного качества (прежде всего качество поверхности среза и отклонения от плоскостности заготовки);

обеспечение требуемой стойкости инструмента (зависит от экономических показателей и объема партии изделий);

обеспечение надежности технологического процесса.

В качестве ограничений и условий надежности разделительных операций примем соответственно возможность разрушения инструмента и требования технической совместимости геометрических параметров (например, по зазору).

Вектор независимых варьируемых переменных имеет вид

$$\{\bar{X}\} = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\},$$

где X_1 — начальный зазор между пуансоном и матрицей; X_2 — начальный радиус скругления режущих кромок пуансона; X_3 — механические

свойства заготовки; X_4 — сдвиг центра пуансона; X_5 — угол наклона пуансона.

В силу самой своей сути разделительные операции приводят к исчерпанию запаса пластичности по линии (поверхности) разделения детали и отхода. Из непрерывности степени деформации e_i следует, что в областях детали и отхода, прилегающих к поверхности разделения, запас пластичности должен быть в значительной мере исчерпан.

Учитывая желательность дальнейшего формоизменения полученной детали без промежуточной термообработки, восстанавливающей запас пластичности, будем оценивать качество поверхности среза по величине областей, в которых запас пластичности близок к исчерпанию, а отклонения от плоскостности — непосредственно.

Соответственно под заданием качества деталей будем понимать задание величин ω_{\max} , $S_{\omega_{\max}}$, P_{\max} . Здесь ω_{\max} — коэффициент использования ресурса пластичности; $S_{\omega_{\max}}$ — максимально допустимый размер области детали (прилегающей к поверхности разделения), в которой коэффициент ω использования ресурса пластичности может превосходить величину ω_{\max} ; P_{\max} — максимально допустимое отклонение от плоскостности.

В процессе изготовления партии деталей (N штук), во-первых, заданное качество должно быть у всех деталей (то есть отклонение от плоскостности i -й детали должно удовлетворять условию $P_i < P_{\max}$, а размер S_i той области детали, в которой выполняется неравенство $\omega > \omega_{\max}$, в свою очередь, — удовлетворять неравенству $S_i < S_{\omega_{\max}}$; во-вторых, по экономическим соображениям идеальным было бы изготовление партии минимальным количеством комплектов инструментов (если N не слишком велико, то одним комплектом). Для этого нужно обеспечить соответствующий контролируемый износ инструмента, другими словами, требуемую стойкость. Отсюда следует, что с экономической точки зрения оптимально, чтобы качество последних изготовленных деталей было близко к пороговому (заданному).

Однако в силу случайных факторов (например, погрешности установки пуансона), оказывающих существенное влияние как на качество

изделий, так и на износ инструмента, невозможно получить точный прогноз этих характеристик, а следовательно, и его ресурса работы.

Под надежностью технологического процесса будем понимать обеспечение устойчивого изготовления партии деталей заданного качества и объема, несмотря на влияние случайных факторов.

Отклонения установки пуансона [2] приводят к неравномерности зазора по периметру отверстия. Обозначим как $Z = Z(X_1, X_4, X_5)$ минимум этого неравномерного зазора и назовем величину Z реальным минимальным зазором. Реальный минимальный зазор Z должен быть положительным: $Z(X_1, X_4, X_5) > 0$. Обеспечение положительности Z накладывает ограничения на возможные значения величин X_1 , X_4 , X_5 . Во-первых, начальный зазор X_1 должен быть положительным, иначе любые отклонения установки приведут к отрицательности величины Z ; а во-вторых, чем меньше величина X_1 , тем более строгие ограничения необходимо наложить на X_4 , X_5 с целью обеспечения положительности реального минимального зазора. Поскольку экономически это означает возрастание стоимости установки инструмента, то X_1 должен быть не слишком малым.

Задание величин ω_{\max} , $S_{\omega_{\max}}$, P_{\max} и механических свойств X_3 заготовки оставляет возможность распорядиться начальным зазором X_1 , требованиями к начальной остроте режущих кромок инструмента (прежде всего пуансона), т. е. начальным радиусом скругления режущих кромок пуансона X_2 , а также требованиями к начальной точности установки пуансона, иными словами, — возможными значениями величин X_4 , X_5 . Причем реально можно лишь задать область их возможных значений в зависимости от зазора X_1 и рассматривать их значения как случайные в заданных диапазонах вида $[0; C]$, где C определяется используемыми инструментами контроля установки, а необходимость использования того или иного инструмента зависит от X_1 . Таким образом, реально управляемыми независимыми переменными являются лишь X_1 и X_2 .

После их задания начинается процесс вырубки деталей, в результате которого происходит интенсивный износ рабочих поверхностей пуан-

сона. Причем износ режущих кромок приводит к увеличению текущей величины радиуса скругления, а износ боковой поверхности пуансона — к увеличению текущей величины зазора. Это увеличение радиуса скругления и зазора в свою очередь приводит к изменению характера износа.

Будем считать, что сдвиг центра и угол наклона пуансона в процессе вырубki не изменяются.

Изменение (увеличение) величин радиуса скругления и зазора приводит к изменению (начиная с некоторого момента — ухудшению) качества деталей.

Опишем область D допустимых значений переменных:

для всех $i \in 1, \dots, N$ должны выполняться неравенства $S_i < S_{\omega \max}$ и $P_i < P_{\max}$;

реальный минимальный зазор должен быть положительным, т. е. $Z(X_1, X_4, X_5) > 0$.

В качестве скалярных критериев оптимальности, обеспечивающих заданное качество деталей и надежность технологического процесса, примем такие: для всех $i \in 1, \dots, N$ потребуем, чтобы

$$W_{1i}(\bar{X}) = S_i - S_{\omega \max} \rightarrow \min;$$

$$W_{2i}(\bar{X}) = P_i - P_{\max} \rightarrow \min.$$

Это обеспечивает максимальный запас качества, а наличие запаса дает защиту от случайных факторов, определяя тем самым надежность.

В качестве критериев оптимальности в плане требуемой стойкости инструмента и качества деталей возьмем

$$W_{3S}(\bar{X}) = \max S_i - \min S_i \rightarrow \min;$$

$$W_{3P}(\bar{X}) = \max P_i - \min P_i \rightarrow \min.$$

Эти критерии обеспечивают однородность деталей партии (то есть минимальное отличие одной детали от другой), а также (поскольку износ инструмента приводит к изменению качества деталей) и минимальный износ, т. е. требуемую стойкость инструмента.

Приходим к следующей модели принятия решения:

$$\bar{W}(\bar{X}) \rightarrow \min;$$

$$\bar{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \in D,$$

$$\text{где } D = \left\{ \bar{X} \left| \begin{array}{l} P_{\max} - P_i \geq 0; \\ S_{\omega \max} - S_i \geq 0 \text{ для } i = 1, 2, \dots, N; \\ Z(\bar{X}) \geq 0 \end{array} \right. \right\};$$

$\bar{W}(\bar{X}) = (W_{11}(\bar{X}), \dots, W_{1N}(\bar{X}), W_{21}(\bar{X}), \dots, W_{2i}(\bar{X}), W_{3S}(\bar{X}), W_{3P}(\bar{X}))$ — векторный критерий оптимальности.

Вообще говоря, оптимальное решение \bar{X}_* векторной оптимизации не является оптимальным для частных критериев.

Сведение многокритериальной задачи к однокритериальной может быть проведено различными путями. Из-за наличия ограничений на величины P_i, S_i целесообразно сначала уменьшить размерность многокритериальной задачи, заменив критерии $W_{11}(\bar{X}), \dots, W_{1N}(\bar{X})$ одним минимаксным критерием $\min(-W_{1i}(\bar{X})) \rightarrow \max$, или $W_{1i}(\bar{X}) = \max(W_{1i}(\bar{X})) \rightarrow \min$, а критерии $W_{21}(\bar{X}), \dots, W_{2N}(\bar{X})$ — одним минимаксным критерием:

$$\min(-W_{2i}(\bar{X})) \rightarrow \max,$$

$$\text{или } W_{2i}(\bar{X}) = \max(W_{2i}(\bar{X})) \rightarrow \min.$$

Такая замена отвечает задаче обеспечения требуемого качества деталей и надежности технологического процесса, так как приводит к созданию запаса качества деталей.

Теперь имеем следующую модель принятия решения:

$$\bar{W}(\bar{X}) \rightarrow \min;$$

$$\bar{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) \in D,$$

$$\text{где } D = \left\{ \bar{X} \left| \begin{array}{l} P_{\max} - P_i \geq 0; \\ S_{\omega \max} - S_i \geq 0, \text{ для } i = 1, 2, \dots, N; \\ Z(\bar{X}) \geq 0 \end{array} \right. \right\};$$

$\bar{W}(\bar{X}) = (W_1(\bar{X}), W_2(\bar{X}), W_{3S}(\bar{X}), W_{3P}(\bar{X}))$ — векторный критерий оптимальности.

Дальнейшее сведение задачи к однокритериальной разумно провести методом линейной свертки [3], так как он позволяет, определив коэффициенты $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_{3S}, \alpha_{3P}$ методом экспертной оценки, учесть относительную значимость критериев, наиболее полно отражающую цели проектирования:

$$W(\bar{X}) = \alpha_1 W_1(\bar{X}) + \alpha_2 W_2(\bar{X}) +$$

$$+ \alpha_{3S} W_{3S}(\bar{X}) + \alpha_{3P} W_{3P}(\bar{X}) \rightarrow \min.$$

В процессе вырубki происходит, как уже говорилось, увеличение зазора и радиуса скругления кромок пуансона. Обозначим через X_{1i} величину зазора после вырубki i -й детали (тог-

да $X_{10} = X_1$ — начальный зазор), а через X_{2i} — величину радиуса скругления кромок пуансона после вырубki i -й детали (тогда $X_{20} = X_2$ — начальный радиус скругления). Увеличение этих величин при изготовлении i -й детали прямо пропорционально работе, произведенной рабочей поверхностью пуансона, причем работа $A_{\text{rad } i}$ режущих кромок приводит к увеличению радиуса, а работа $A_{\text{zaz } i}$ боковой поверхности — к увеличению зазора (работа $A_{\text{тор } i}$ торцевой поверхности — к появлению некоторой конусности торца). Тогда получаем:

$$\begin{aligned} X_{1(i+1)} &= X_{1i} + kA_{\text{zaz } i}(X_{1i}, X_{2i}), \\ X_{2(i+1)} &= X_{2i} + kA_{\text{rad } i}(X_{1i}, X_{2i}). \end{aligned} \quad (1)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Заметим, что если рассматривать зазор и радиус не как последовательности, а как непрерывные функции от времени, то из (1) (аналогично (1)) можно построить систему дифференциальных уравнений для радиуса и зазора:

$$\begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= A_{\text{zaz } i}(X_1(t), X_2(t)), \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= A_{\text{rad } i}(X_1(t), X_2(t)). \end{aligned} \quad (2)$$

Коэффициент k приобретает тогда смысл шага по времени.

Здесь (в (1) и (2)) функции $A_{\text{rad } i}$, $A_{\text{zaz } i}$ неизвестны, но их можно аппроксимировать.

Рассмотрим область возможных значений зазора и радиуса скругления в процессе вырубki. Для конкретной вырубki ее траектория, понимаемая как последовательность точек (X_{1i}, X_{2i}) , начинается в точке (X_1, X_2) и продолжается в соответствии с формулами (1). Если считать зависимости P_i , S_i , $A_{\text{rad } i}$, $A_{\text{zaz } i}$ от X_1, X_2 установленными, то в плоскости (X_1, X_2) можно построить область D допустимых значений переменных и траекторию вырубki. В том случае, если вся траектория расположена внутри области D , все изготовленные детали будут годными. Причем, если подставить все точки траекторий в указанные зависимости, то можно вычислить максимальные и минимальные значения величин P_i , S_i и соответственно значения функций $W_1(\bar{X})$, $W_2(\bar{X})$, $W_{3S}(\bar{X})$, $W_{3P}(\bar{X})$.

На рис. 1 приведены зависимости P_i , S_i , $A_{\text{rad } i}$, $A_{\text{zaz } i}$ от X_1, X_2 , рассчитанные методом конечных элементов [2].

С целью упрощения построения области D постараемся подобрать аппроксимации для величин P_i и S_i попроще. Из анализа характера зависимости величины P_i от зазора и радиуса скругления можно сделать вывод о том, что отклонение от плоскостности уменьшается при сохранении зазора и увеличении радиуса скругления кромок пуансона и увеличивается при увеличении зазора. Поэтому аппроксимируем P_i выражением (коэффициенты подобраны методом наименьших квадратов)

$$P_i = (1,516 + 0,909X_1)(2,828 - 7,560X_2). \quad (3)$$

Величину S_i аппроксимируем линейной зависимостью

$$S_i = 3,29 + 5,09X_1 + 2,63X_2. \quad (4)$$

Здесь X_1, X_2 измеряются в миллиметрах, P_i, S_i — в процентах, размерность коэффициентов — соответствующая.

Для построения области D полагаем $S_i = S_{\omega_{\text{max}}}$, $P_i = P_{\text{max}}$ в формулах (3) и (4), а затем выражаем переменную X_2 . Область D допустимых значений переменных при таких аппроксимациях зависимостей (принято $\omega_{\text{max}} = 0,3$; $S_{\omega_{\text{max}}} = 4,5\%$, $P_{\text{max}} = 3,4\%$) имеет вид, представленный на рис. 2.

Здесь темно-серым цветом выделена допустимая область (при дополнительном предположении, что зазор, меньший 1%, неприемлем из-за высокой стоимости установки инструмента без искажений); серым показана дополнительная область возможных значений, получаемая при отказе от недопустимости малых зазоров.

Из рис 1, а, б видно, что линейная аппроксимация для $A_{\text{rad } i}$, $A_{\text{zaz } i}$ неудовлетворительна, так как не отражает впадину около зазора 0,12 мм, т. е. 6%. В связи со сложным характером зависимости величин $A_{\text{rad } i}$, $A_{\text{zaz } i}$ от радиуса скругления и зазора аппроксимируем их кусочно-линейными функциями переменных от (X_1, X_2) следующим образом. Разобьем так или иначе прямоугольник $[0; 0,2] \times [0,05; 0,25]$ рассматриваемых возможных значений переменных (X_1, X_2) на треугольники, используя в качестве

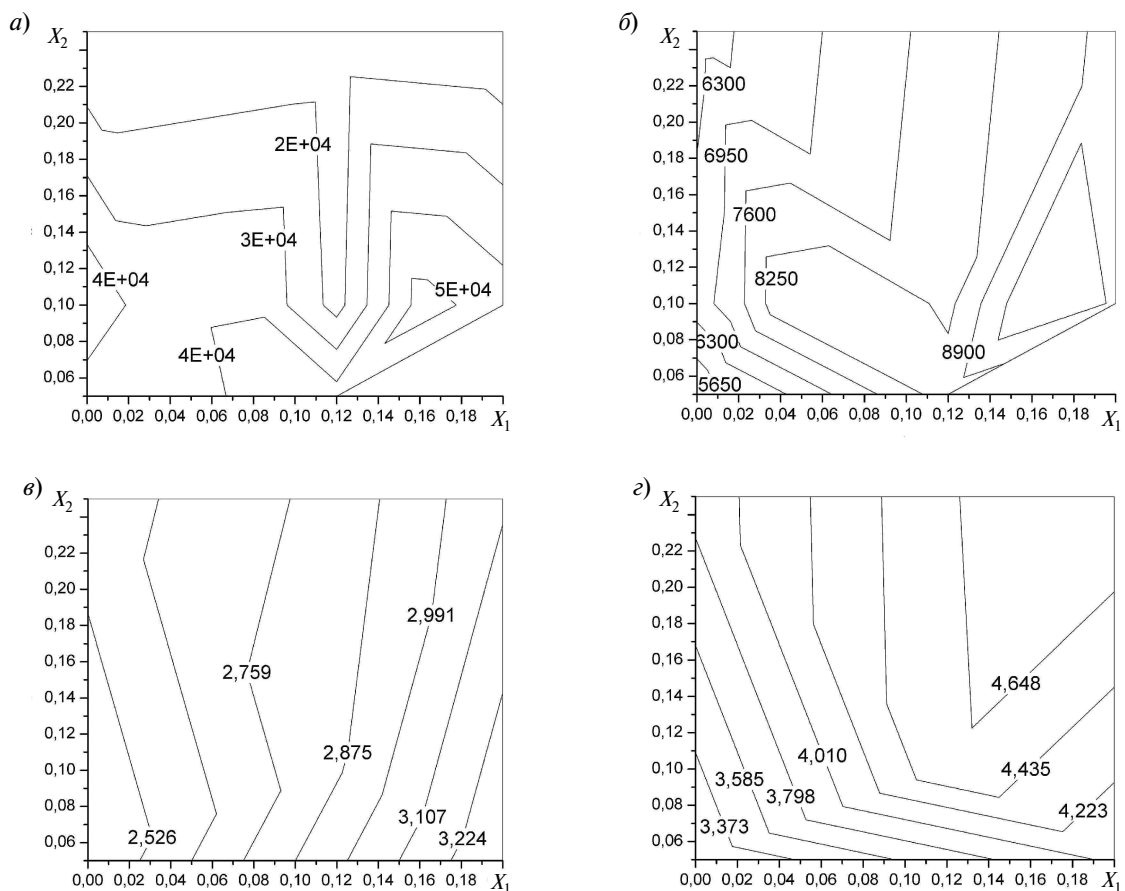


Рис. 1. Рассчитанные методом КЭ зависимости величин A_{radi} (а), A_{zazi} (б), P_i (в), S_i (г) от X_1, X_2 (здесь $\omega_{max} = 30\%$)

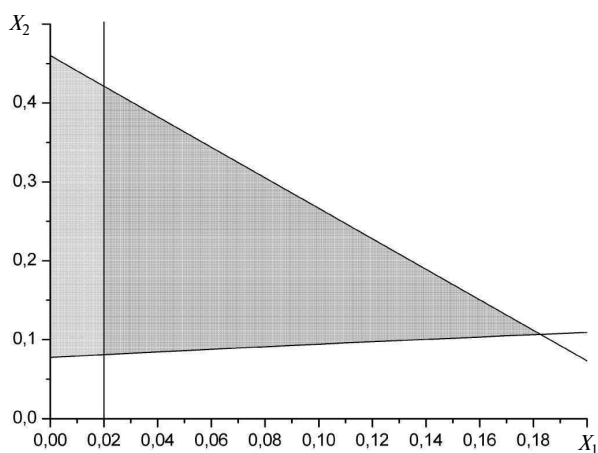


Рис. 2. Область допустимых значений переменных X_1, X_2



вершин треугольников только те точки, в которых произведены расчеты величин $A_{rad i}$, A_{zazi} . Затем примем, что аппроксимирующие значения в произвольной точке прямоугольника равны значениям на плоскости, построенной над тем треугольником, куда попала данная точка.

Далее, поскольку при вырубке происходит увеличение и радиуса скругления, и зазора, поиск минимума целесообразно проводить следующим образом. Задав начальные значения зазора и радиуса так, чтобы начальная точка (X_{10}, X_{50}) располагалась на «кривой начальных значений» — нижней стороне области D , рассчитаем траекторию вырубki по (1) с учетом принятых аппроксимаций $A_{rad i}$, A_{zazi} . Затем проверим, чтобы вся траектория целиком располагалась в области D . Для полученной траектории вырубki вычисляем значения скалярных критериев $W_1(\bar{X})$, $W_2(\bar{X})$, $W_{3S}(\bar{X})$, $W_{3P}(\bar{X})$ и критерия $\bar{W}(\bar{X})$.

Выбирая начальные точки с достаточно малым шагом и сравнивая для полученных траекторий значения критерия $\bar{W}(\bar{X})$, находим оптимальные значения начального зазора и радиуса скругления.

Будем считать, что объем вырубki N соответствует 200 шагам по формулам (1). Подчеркнем, что это соответствие — условное и не означает, что $N = 200$. Коэффициент пропорциональности в (1) полагаем $k = 2 \cdot 10^{-8}$. Точки

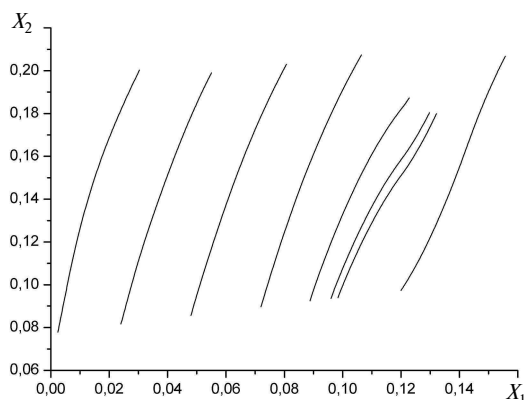


Рис. 3. Траектории вырубki

на кривой начальных значений берем с шагом 0,0024. Типичные траектории вырубki приведены на рис. 3.

Из рис. 3 видно следующее: 1) длина траекторий для разных начальных точек различна; 2) траектории при малых зазорах (на рисунке они расположены левее) выпуклы вверх, причем с увеличением зазора на траекториях появляется точка перегиба; 3) при малых начальных зазорах сначала быстрее происходит износ режущих кромок, чем боковой поверхности, затем скорости износа слегка приближаются друг к другу.

На рис. 4 приведены значения критериев для различных начальных зазоров.

Так как начальные точки траекторий были выбраны на кривой начальных значений, во всех

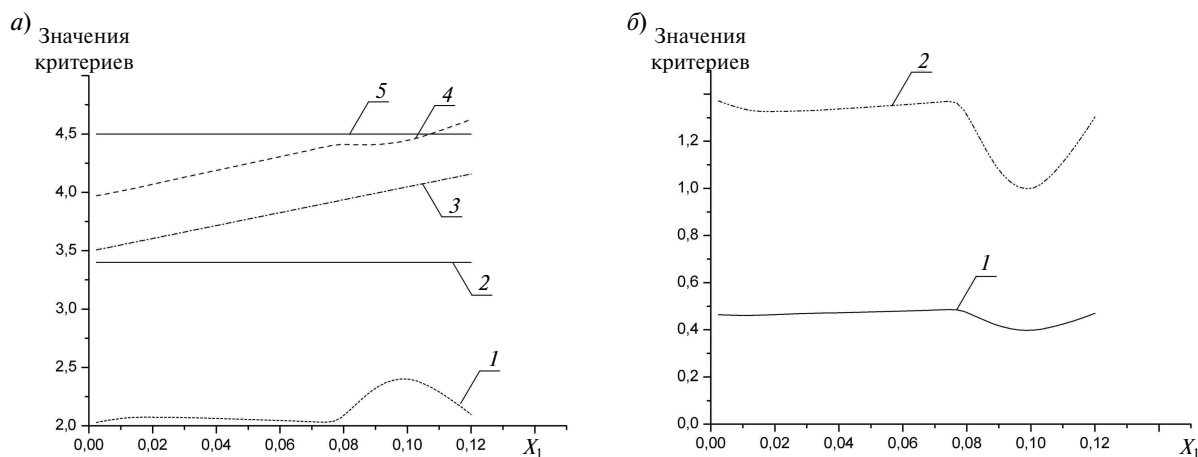


Рис. 4. Значения критериев для различных начальных зазоров X_1 (отложены по оси OX):
 а — $\min_i(P_i)$ (1); $\max_i(P_i) = W_2(\bar{X}) + P_{\max}$ (2); $\min_i(S_i)$ (3); $\max_i(S_i) = W_1(\bar{X}) + S_{0,\max}$ (4); $S_{0,\max} = 4,5\%$ (5);
 б — $W_{3S}(\bar{X})$ (1); $W_{3P}(\bar{X})$ (2)

точках которой по ее построению $P_i = 3,4 \%$, то, во-первых, для всех траекторий $\max P_i = 3,4 \%$ и $W_2(\bar{X}) = 0\%$, а во-вторых, для всех траекторий в векторе \bar{X} величина X_2 связана с X_1 соотношением (3) при $P_i = P_{\max}$. Заметим также, что тот участок кривой 4 на рис. 4, а, который расположен над прямой 5, соответствует неприемлемым начальным значениям — при них траектория не полностью попадает в область D , т. е. некоторое количество последних деталей будут бракованными.

Минимум критериев $W_{3S}(\bar{X})$, $W_{3P}(\bar{X})$ достигается при начальном зазоре 0,0984 мм (тогда начальный радиус скругления 0,09398 мм).

Таким образом, принимая $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $\alpha_3 = \alpha_4 = 1/2$, получаем $W(\bar{X})_{\min} = 0,698$ при начальном зазоре примерно 5 % с каждой стороны.

Окончательный вариант технологического процесса должен выбираться с привлечением дополнительных экономических критериев, например приведенной суммы затрат на изготовление.

В результате проведенных исследований корректно поставлена и разработана процедура решения задачи оптимального параметрического синтеза.

На плоскости «зазор — радиус скругления пуансона» определено понятие траектории вырубки.

Изучено влияние начальных значений зазора и радиуса скругления пуансона на траекторию вырубки.

Вычислены оптимальные начальный зазор и радиус скругления, обеспечивающие изготовление вырубкой однородной партии деталей с заданными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афанасьев, А.С.** Системное проектирование конструкций и технологий изготовления изделий ответственного назначения [Текст] / А.С. Афанасьев, К.М. Иванов, И.Г. Воронцова // СПб.: Изд-во БГТУ, 2011.
2. **Иванов, К.М.** Влияние точности установки на стойкость инструмента в процессе вырубки — про-

бивки [Текст] / К.М. Иванов, П.М. Винник // Металлообработка. — СПб.: Политехника, 2012.

3. **Сафронов, В.В.** Основы системного анализа: методы многовекторной оптимизации и многовекторного ранжирования [Текст] / В.В. Сафронов. — Саратов: Научная книга, 2009.

REFERENCES

1. **Afanas'ev A.S., Ivanov K.M., Vorontsova I.G.** Sistemnoe proektirovanie konstruktssii i tekhnologii izgotovleniia izdelii otvetstvennogo naznacheniiia [Tekst]. — SPb.: BGTU, 2011. (rus.)
2. **Ivanov K.M., Vinnik P.M.** Vliianie tochnosti us-

tanovki na stoikost' instrumenta v protsesse vyrubki-probivki [Tekst] // Metalloobrabotka. — SPb.: Politekhnik, 2012. (rus.)

3. **Safronov V.V.** Osnovy sistemnogo analiza: metody mnogovektornoi optimizatsii i mnogovektornogo ranzhirovaniia [Tekst]. — Saratov: Nauchnaia kniga, 2009. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

ВИННИК Петр Михайлович — кандидат физико-математических наук доцент кафедры высшей математики Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова; 190005, 1-ая Красноармейская ул., д.1, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: vinnik.pm@gmail.com

VINNIK Petr M. — Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D. F. Ustinov; 1st Krasnoarmeyskaya st., 1, St-Petersburg, Russia; e-mail: vinnik.pm@gmail.com

ИВАНОВ Константин Михайлович — доктор технических наук профессор, заведующий кафедрой технологии производства артиллерийских систем и боеприпасов и ректор Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова; 190005, 1-ая Красноармейская ул., д.1, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: Rector@bstu.spb.su

IVANOV Konstantin M. — Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D. F. Ustinov; 1st Krasnoarmeyskaya st., 1, St-Petersburg, Russia; e-mail: Rector@bstu.spb.su

АФАНАСЬЕВ Александр Сергеевич — кандидат технических наук доцент кафедры высокоэнергетических устройств автоматических систем Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова; 190005, 1-ая Красноармейская ул., д.1, Санкт-Петербург, Россия; E-mail: afanasjeff64@gmail.com

AFANASIEFF Alexander S. — Baltic State Technical University «Voenmeh» named after D. F. Ustinov; 1st Krasnoarmeyskaya st., 1, St-Petersburg, Russia; e-mail: afanasjeff64@gmail.com