



ISSN 0201-7164

საქართველოს ჟურნალისტთა უნივერსიზმის  
საქართველოს ჟურნალისტთა უნივერსიზმის

# შრომები

№ 1 (403)

თბილისი

1994

ISSN 0201-7164

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY  
ГРУЗИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

შ რ მ ე ბ ი  
TRANSACTIONS  
Т Р У Д Ы  
№ 1 (403)

თბილისი — TBILISI — ТВИЛИСИ  
1994

მე-3 ნახ-ზე წარმოდგენილია **ნ.ს.შ.** საშუალო სისქის დეფორმაციის დამოკიდებულება **N** იმპულსების რაოდენობაზე, წნევის სხვადასხვა ამპლიტუდისათვის. როგორც ნათელია, ყველაზე უფრო ოპტიმალურია 4-5 იმპულსით ზემოქმედებისას მიღებული დეტალები, რადგან შემდგომი იმპულსების ზემოქმედება, პრაქტიკულად, ნამზადის დეფორმირებას არ იწვევს, თუმცა ეს დამოკიდებულია მასალის ფიზიკურ-მექანიკურ მახასიათებელ სიდიდეებზე.

გამოკვლევულ იქნა მრავალიმპულსური ლაზერულ-მექანიკური ზემოქმედებისას ფურცლოვანი ნამზადის ჩალუნვების სიდიდეები და შესაძლებელი გახდა დამატებითი დატვირთვის სიდიდის განსაზღვრა, რომელიც გამოიწვევს ნამზადის საბოლოო ჩალუნვას. ექსპერიმენტულად დამტკიცებულია, რომ მრავალიმპულსური ლაზერულ-მექანიკური ზემოქმედებისას ეფექტურია 4-5 იმპულსით ზემოქმედება. თუმცა, ეს ეფექტი დამოკიდებულია ნამზადის მასალის ფიზიკურ-მექანიკურ თვისებებზე. მრავალიმპულსური ლაზერულ-მექანიკური ზემოქმედებით მიღებული დეტალის ფორმა, ერთი იმპულსის ზემოქმედებით მიღებული კონუსური ფორმისაგან განსხვავებით, სფერულს უახლოვდება.

#### ლიტერატურა-ЛИТЕРАТУРА-REFERENCES

1.ჯ.ბახტაძე, მ.წიქარიშვილი. თხელკედლიანი ფურცლოვანი ნამზადის დაძაბულ-დეფორმირებული მდგომარეობის ანალიზი ლაზერულ-მექანიკური ზემოქმედებისას. სტუ-ს შრომების კრებული № 9, თბილისი, 1993.

კონსტრუქციების დაზიანების  
ტექნიკური დიაგნოსტიკის კათედრა

რედაქციაში შემოვიდა  
21.10.1993

УДК 621.047

А.Н. Шармазанашвили

#### К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Полное раскрытие потенциальных возможностей высокоавтоматизированных станков с ЧПУ, обрабатывающих центров, ГПС и т.п., в значительной степени зависит от разработки и внедрения эффективных методов параметрической оптимизации технологических процессов.

В настоящее время наиболее распространенными являются детерминированные модели параметрической оптимизации - определение параметров режима обработки на основе накопленного эмпирического материала, поисковые и беспойсковые алгоритмы оптимизации [1] и др. Однако в ряде случаев детерминированные постановки не оказываются приемлемыми - из-за стохастичности производственного процесса механической обработки. Наличие технологических возмущений, особенно в условиях многономенклатурного производства - колебание параметров заготовки (твердости и припуска), физико-механических свойств режущего инструмента, параметров оборудования и оснастки, оказывают значительное влияние на параметры оптимального режима.

В этой связи в статье исследуется зависимость оптимальных режимов обработки от основных технологических возмущений - изменение припуска (глубины резания) и твердости заготовки, и приводится количественный анализ этой зависимости для различных моделей параметрической оптимизации.

#### Описание исследовательской модели параметрической оптимизации

При параметрической оптимизации технологического процесса необходимо учитывать затраты на выполнение как основных, так и вспомогательных технологических операций. Поэтому практически все модели параметрической оптимизации отражают механизм процесса износа режущего инструмента, а целевая функция учитывает как максимально производительный сьем припуска, так и затраты, связанные с инструментом.

С этой целью для проведения исследований в качестве аппроксимирующей зависимости  $T=f(V,S,T)$  примем расширенное уравнение Тейлора

$$T = \frac{C_T}{V^{\mu} S^{\nu} t^{\rho}} \quad (1)$$

где  $C_T$  - это коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, вида инструмента, геометрических параметров его режущей части, размеров сечения срез и смазочно-охлаждающей жидкости;  $\mu, \nu, \rho$  - показатели степени, зависящие от свойств инструмента и условий резания.

Выбор указанной зависимости обусловлен наличием большого количества экспериментального материала, а также удобством и приемлемой точностью качественного анализа.

Для отыскания оптимальных значений параметров режима ( $V$  и  $S$ ) необходимо и достаточно совместное решение системы из двух уравнений - условий оптимальности. С другой стороны, известно, что при стойкостной зависимости Тейлора, целевая функция не имеет безусловного экстремума, а условный экстремум находится на границе допустимых значений режимов обработки. Следовательно, одним из

условий оптимальности постоянно будет выступать условие ограничения.

В общем виде, все условия ограничения могут быть записаны как функции параметров режима обработки:

$$C_{m_i} V^\alpha S^\beta t^\sigma = M_i < \Pi_i \quad i=1,2,3 \dots n, \quad (2)$$

где  $M_i$  - ограничивающий параметр,

$C_m$  - постоянный коэффициент, зависящий от условий обработки,

$\Pi_i$  - допустимое значение ограничивающего параметра.

Вторым условием оптимальности является уравнение оптимальной стойкости.

В работе [1] М.М. Тверским выведено выражение для оптимальной стойкости

$$T_o = \left[ \frac{\alpha V - \beta M}{\alpha - \beta} - 1 \right] \gamma_{\Pi}, \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta, M, V$  - показатели степени в выражениях (1) и (2).  $\gamma_{\Pi} = \tau_{cm} + \frac{E_H}{E_c}$   $\tau_{cm}$  - время смены инструмента,  $E_H$  - стоимость инструмента, включая стоимость переточки,  $E_c$  - стоимость станкоминуты.

При  $\alpha=0$  из (3) можно получить хорошо известное уравнение для экономической стойкости:

$$T_v = \gamma_{\Pi} (M - 1).$$

С некоторым допущением можно считать, что значение оптимальной стойкости зависит только от технико-экономических показателей и условий обработки, т.е.  $T_o = \text{const}$  для различных сочетаний параметров режима. Реально это не так, о чем свидетельствуют исследования Н.М. Зорева, однако при качественном анализе такое допущение не приводит к существенным неточностям.

Таким образом, оптимальное значение стойкости можно поддерживать постоянным для любого значения  $t$  или  $HV$ , путем подбора разного сочетания  $V$  и  $S$ , что приводит к оптимизации процесса обработки. Это сочетание  $V$  и  $S$  можно найти в результате совместного решения уравнений (1) и (2). Герметрическая интерпретация сказанного заключается в следующем: уравнению (3) в трехкоординатной плоскости соответствует поверхность, проекция которой образует на плоскости  $V \times S$  линию, пересекающую линию ограничения на поверхности отклика в точке, соответствующей условному минимуму целевой функции (рис. 1).

При этом, так как стойкость инструмента величина положительная, то (3) имеет смысл только при условии

$$\frac{\alpha V - \beta M}{\alpha - \beta} > 1. \quad (4)$$

Если условия обработки таковы, что (4) не выполняется, то (3) теряет смысл

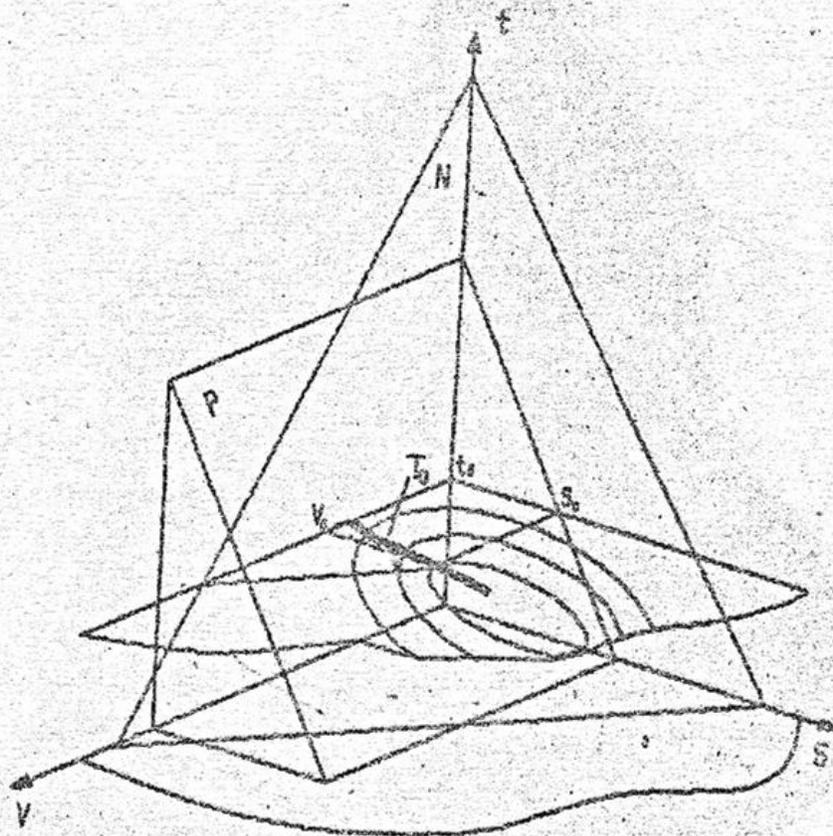


Рис.1

и в таком случае поверхность  $[T_0]$  и ограничение в области допустимых значений режимов обработки не пересекаются, а точка экстремума находится на пересечении двух взаимопересекающихся поверхностей ограничения.

С учетом вышесказанного ниже дан соответствующий анализ для однократной токарной обработки (рис.2).

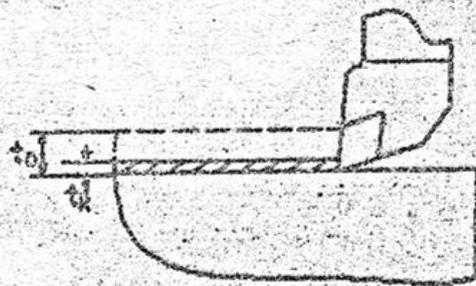


Рис.2

При этом исследовании проведены для наиболее часто встречающихся условий: Заготовка сталь 45 HB180  $\phi$  100мм, Инструмент T15K6,  $\mu=5$ ;  $\nu=1,75$ ;  $\rho=0,9$ ;  $\beta_z=0,75$ ;  $\beta_y=0,75$ ;  $\beta_x=0,65$ ;  $\gamma_z=1$ ;  $\gamma_y=0,9$ ;  $\gamma_x=1,2$ ;  $\alpha_z=0,75$ ;  $\alpha_y=2$ ;  $\alpha_x=1,5$ ; при ограничениях: по усилию резания [P], по мощности резания [N] и шероховатости

обработанной поверхности  $[R_2]$ .

Значения показателей степени подобраны из источника [2].

Изменение припуска  $(HB=Const)$ .

1. Активным является ограничение  $[P]$ .

Аналитическое выражение для силы резания имеет вид:

$$P = C_p V^\alpha S^\beta t^\gamma HB^n.$$

Однако, как показано в работе [3], изменение усилия резания при относительно больших скоростях резания не превышает 10%. Поэтому можно считать, что  $\alpha=0$ , и следовательно,

$$P = C_p S^\beta t^\gamma HB^n. \quad (5)$$

Таким образом, в трехкоординатной плоскости ограничению  $[P]$  соответствует поверхность, параллельная оси  $V$ , и ограничивающая площадь среза  $(S \times t)$ .

Так как  $\alpha=0$ , то условие наличия точки оптимальной стойкости на поверхности ограничения  $[P]$  из (4) будет иметь вид

$$\mu > 1. \quad (6)$$

При выполнении (6) условный экстремум целевой функции находится на пересечении линий  $[T_0]$  и  $[P]$ . В результате для отыскания точки экстремума при измененной глубине резания, из условия  $[T_0]=const$  и  $[P]=const$ , необходимо решить систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} V_k^m S_k^p t_k^q = V_0^m S_0^p t_0^q \\ S_k^\beta t_k^\gamma = S_0^\beta t_0^\gamma \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $V_0, S_0, t_0$  - режимы обработки до коррекции,  $V_k, S_k, t_k$  - режимы обработки после коррекции.

Из (7) для рабочей модели параметрической оптимизации получим

$$\begin{aligned} S_k &= S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-\frac{p}{\beta}}, \\ V_k &= V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-(p-\nu\frac{\beta}{\beta_2})\frac{1}{\beta}}. \end{aligned} \quad (8)$$

При черновых проходах в качестве ограничивающего параметра, как обычно, выступает тангенциальная составляющая силы резания  $[P_2]$ . Поэтому для принятых условий обработки из (8) будем иметь

$$\begin{aligned} S_k &= S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-\frac{\beta_2}{\beta_2}} = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-1,33} \\ V_k &= V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-(p-\nu\frac{\beta_2}{\beta_2})\frac{1}{\beta}} = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{0,287} \end{aligned}$$

Если требования предъявляются по точности обработки, что обычно имеет место при чистовой обработке, то в качестве ограничивающего фактора выступает  $[P_y]$ .

Следовательно, из (8) получим

$$S_x = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-\frac{\delta_x}{\beta_x}} = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-1,2}$$

$$V_k = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-(p-\nu)\frac{\delta_y}{\beta_y}} = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{0,24}$$

При активном ограничении  $[P_x]$  из (8) получим

$$S_x = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-\frac{\delta_x}{\beta_x}} = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-1,37}$$

$$V_k = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-(p-\nu)\frac{\delta_x}{\beta_x}} = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{0,49}$$

Соответствующие кривые, отражающие зависимость оптимальных режимов от изменения припуска, приведены на рис.3.

2. Активным является ограничение  $[N]$ .

Для мощности резания имеем

$$N = \frac{1}{6120} V C_p S^{\beta_z} t^{\gamma_x} H B^{\eta_z} \quad (9)$$

Уравнение  $[N]$  в пространстве  $(V \times S \times t)$  описывает поверхность, пересекающуюся со всеми тремя координатами. Тогда для условия наличия экстремума целевой функции на  $[N]$  из (4) получим:

$$\nu > \beta_z (M-1) + 1 \quad (10)$$

Условие обработки, при котором удовлетворялось бы (10), практически не встречается. Следовательно, линия оптимальной стойкости  $[T_0]$  и ограничение  $[N]$ , в области допустимых значений режимов обработки, пересекаются.

При этом, производная целевой функции по направлению линии  $[N]$  монотонно уменьшается от оси  $V$  к оси  $S$  [1]. Поэтому точка оптимума лежит на пересечении линий  $[N]$  с условием ограничения  $[S]$ .

При изменении глубины резания из условия  $[N]=\text{Const}$  и  $[S]=\text{Const}$ , справедлива система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} S_x = S_0 \\ V_k S_x^{\beta_x} t_k^{\gamma_x} = V_0 S_0^{\beta_x} t_0^{\gamma_x} \end{array} \right\} \quad (11)$$

откуда рабочая модель параметрической оптимизации будет иметь вид:

$$S_x = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right) = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-1}$$

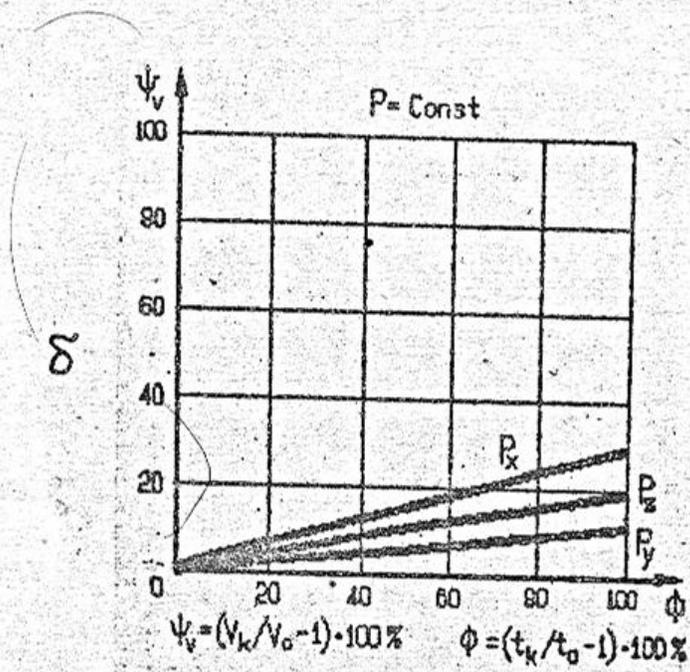
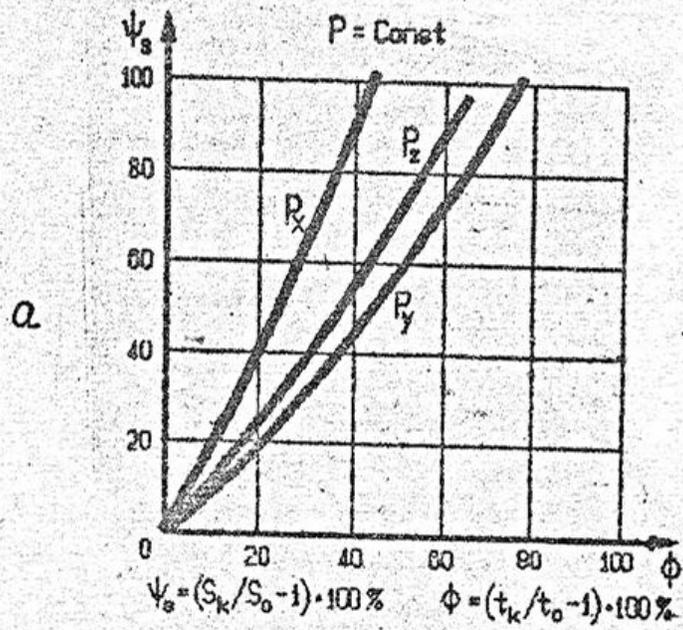


Рис.3

Соответствующие кривые, отражающие зависимость оптимальных режимов от изменения припуска, приведены на рис. 4.

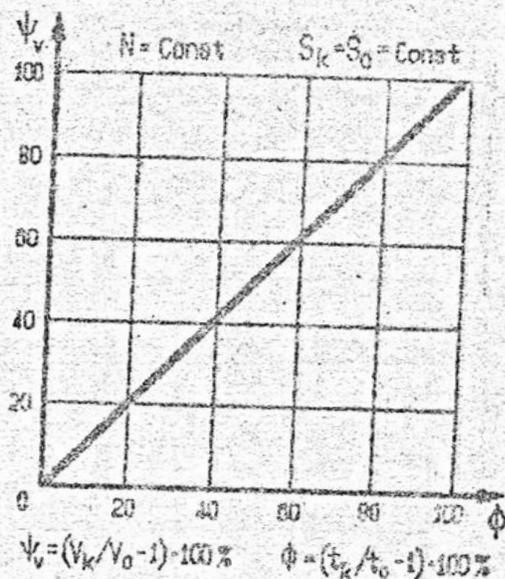


Рис. 4

Однако часто ограничение по подаче [S] не ограничивает область допустимых значений, так как активным при этом является условие [P<sub>2</sub>], ограничивающее площадь среза (S<sub>к1</sub>).

Поэтому случай, когда точка оптимума находится на пересечении линий ограничений [N] и [P<sub>2</sub>], рассмотрим отдельно.

3. Активным ограничением является [P<sub>2</sub>] и [N].

Как уже отмечалось, условием наличия точки оптимальной стойкости на поверхности [P<sub>2</sub>] является  $M > 1$ . С другой стороны,  $M$  не зависит от  $t$ . Поэтому при различных значениях  $t$  происходит "скольжение" точки оптимальной стойкости по поверхности [P<sub>2</sub>].

В случае одновременной активности ограничений по [P<sub>2</sub>] и [N], указанное движение точки оптимальной стойкости вдоль [P<sub>2</sub>] будет ограничено поверхностью [N]. При этом условный минимум целевой функции будет находиться на пересечении линий [P<sub>2</sub>] и [N].

Из условий [N]=Const и [P<sub>2</sub>]=Const, для разных значений глубин резания, справедлива система уравнений

$$\begin{cases} V_k S_k^{\beta_2} t_k^{\gamma_2} = V_0 S_0^{\beta_2} t_0^{\gamma_2} \\ S_k^{\beta_2} t_k^{\gamma_2} = S_0^{\beta_2} t_0^{\gamma_2} \end{cases} \quad (12)$$

Откуда рабочая модель параметрической оптимизации для рассматриваемого условия обработки будет иметь вид:

$$S_k = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-\frac{Rz}{Bz}} = S_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-1,33},$$

$$V_k = V_0$$

Соответствующие кривые, отражающие зависимость оптимальных режимов от изменения припуска, приведены на рис. 5.

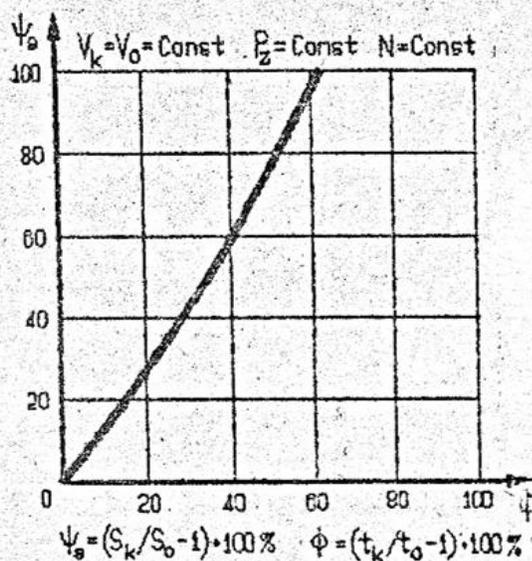


Рис. 5

#### 4. Активным ограничением является [Rz].

Как установлено многочисленными наблюдениями, шероховатость обработанной поверхности практически не зависит от глубины резания. Лишь при уменьшении  $t$  до 0.02-0.03мм, резец начинает скользить по обрабатываемой поверхности периодически врезаясь в нее и вырывая отдельные участки.

Влияние скорости резания на Rz обусловлено образованием нароста. Этот процесс наблюдается при малых скоростях резания и для каждой марки материала имеет свой вполне определенный диапазон. Как отмечается в работе М.М. Маталина, для сталей этот диапазон составляет  $V_H = 1-70$ м/мин. При этом наибольший нарост образуется в диапазоне  $V_H = 20-40$ м/мин.

Как отмечает А.И.Исаев, с увеличением твердости обрабатываемого материала уменьшается влияние скорости резания на Rz, и при твердости HB500кгс/мм оно практически отсутствует.

Таким образом, при соблюдении условия  $V_{min} > V_H$  можно считать, что Rz не является функцией скорости резания, и для нее справедливо аналитическое

выражение

$$[R_z] = \frac{S^2}{8r},$$

где  $r$  - радиус закругления вершины резца.

Следовательно, в трехкоординатном пространстве поверхность  $[R_z]$  является параллельной осям  $V$  и  $i$ .

Условие наличия точки оптимальной стойкости на поверхность ограничения  $[R_z]$ , из (4) имеет вид

$$\mu > 1.$$

При этом линия, соответствующая уравнению  $[T_0]$ , пересекается с  $[R_z]$  и для измененной глубины резания координаты точки оптимума можно найти из системы:

$$\begin{cases} V_k^\mu S_k^\nu t_k^p = V_0^\mu S_0^\nu t_0^p \\ S_k = S_0 \end{cases}, \quad (13)$$

откуда для рассматриваемого условия обработки рабочая модель параметрической оптимизации будет иметь вид:

$$\begin{aligned} S_k &= S_0, \\ V_k &= V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-\frac{p}{\mu}} = V_0 \left( \frac{t_k}{t_0} \right)^{-0,18} \end{aligned}$$

Соответствующие кривые, отражающие зависимость оптимальных режимов от изменения припуска, приведены на рис. 6.

Изменение твердости материала заготовки ( $\tau = \text{Const}$ )

1. Активным является ограничение  $[P]$ .

Если  $\mu > 1$ , то на поверхности  $[P]$  имеется точка оптимальной стойкости и условный минимум целевой функции находится на пересечении двух линий  $[P]$  и  $[T_0]$ .

Следовательно, при изменении твердости для нахождения оптимума необходимо и достаточно решение системы уравнений

$$\begin{cases} S_k^\beta HB_k^n = S_0^\beta HB_0^n \\ V_k^\mu S_k^\nu = V_0^\mu S_0^\nu \end{cases}. \quad (14)$$

Для тангенциальной составляющей усилия резания для выбранного условия обработки получим:

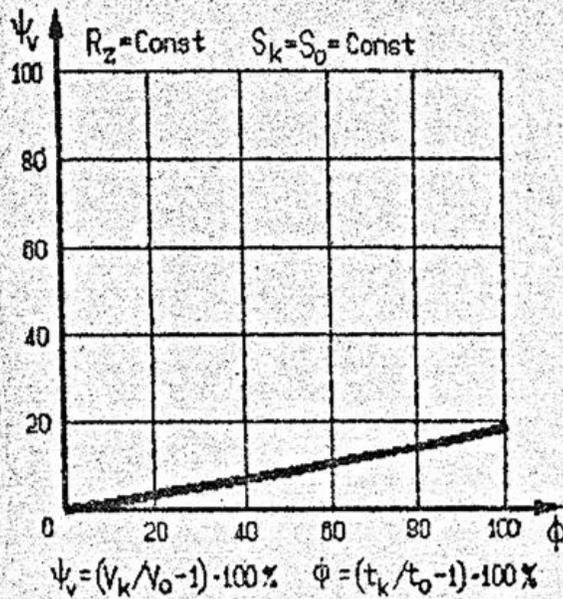


Рис. 6.

$$S_k = S_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{-\frac{n_z}{\beta_z}} = S_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{-1},$$

$$V_k = V_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{\frac{n_z \nu}{\beta_z N}} = V_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{0,35},$$

Для [Py] справедливо

$$S_k = S_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{-\frac{n_y}{\beta_y}} = S_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{-2,67},$$

$$V_k = V_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{\frac{n_y \nu}{\beta_y N}} = V_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{0,9}$$

Для [Px] рабочая модель параметрической оптимизации будет иметь вид:

$$S_k = S_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{-\frac{n_x}{\beta_x}} = S_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{-2,67},$$

$$V_k = V_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{\frac{n_x \nu}{\beta_x N}} = V_o \left( \frac{HB_k}{HB_o} \right)^{0,81}.$$

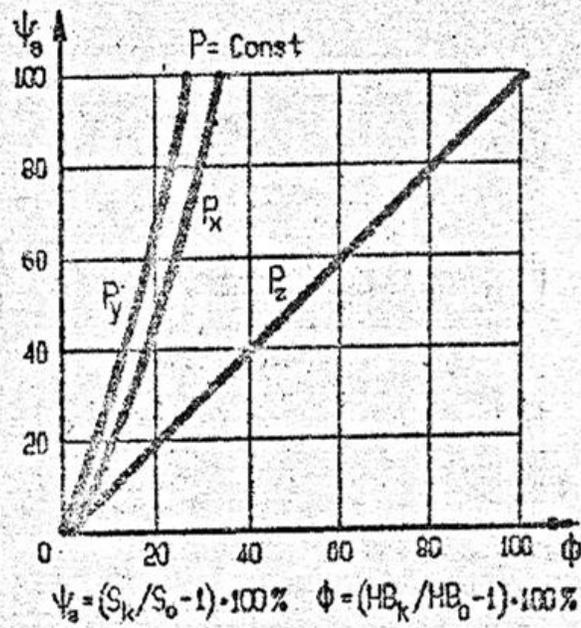
Соответствующие кривые приведены на рис. 7.

2. Активным является ограничение [N].

Как уже отмечалось, условием наличия точки оптимальной стойкости на поверхности [N] является выражение (10), что практически не выполняется не для одного условия. Поэтому условный экстремум целевой функции находится на пересечении ограничений [N] и [S]. При этом справедлива система уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} V_k S_k^{\beta_z} HB_k^{n_z} = V_o S_o^{\beta_z} HB_o^{n_z}, \\ S_k = S_o. \end{array} \right. \quad (15)$$

a



b

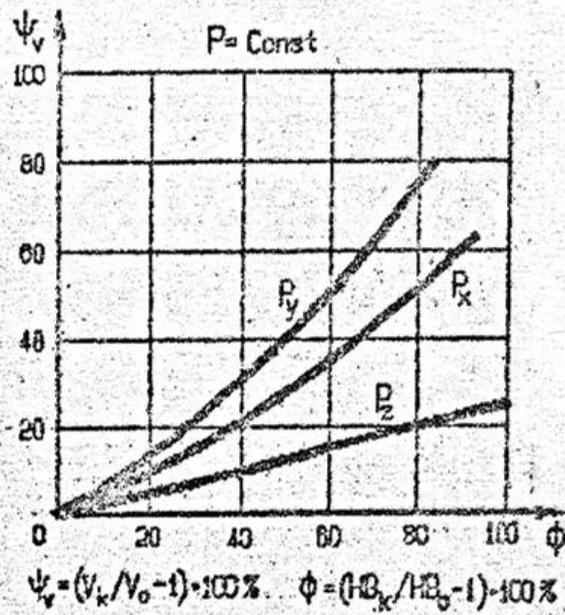


Рис. 7

Откуда для принятых условий обработки, рабочая модель параметрической оптимизации будет иметь вид:

$$S_k = S_0 \left[ \frac{HB_k}{HB_0} \right]^{-n_z} = V_0 \left[ \frac{HB_k}{HB_0} \right]^{-0.75}$$

$$V_k = V_0 \left[ \frac{HB_k}{HB_0} \right]^{-0.75}$$

Соответствующие кривые приведены на рис. 8.

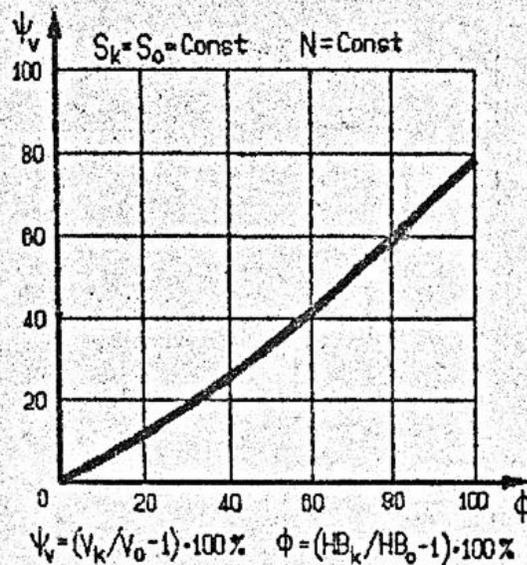


Рис. 8

3. Активными являются ограничения [Pz] и [N].

При этом условный экстремум целевой функции находится на пересечении ограничений [Pz] и [N]. А для вычисления оптимальных параметров режима необходимо решение системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} S_k^{\beta_z} HB_k^{n_z} = S_0^{\beta_z} HB_0^{n_z} \\ V_k S_k^{\beta_z} HB_k^n = V_0 S_0^{\beta_z} HB_0^{n_z} \end{array} \right. \quad (16)$$

Откуда для рабочей модели параметрической оптимизации с учетом принятых условий обработки получим:

$$S_k = S_0 \left[ \frac{HB_k}{HB_0} \right]^{-\frac{n_z}{\beta_z}} = S_0 \left[ \frac{HB_k}{HB_0} \right]^{-1},$$

$$V_k = V_0.$$

Соответствующие кривые приведены на рис. 9.

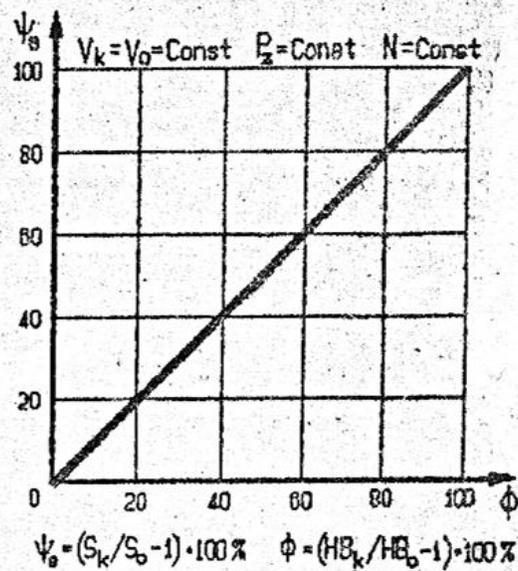


Рис.9

#### Выводы

Таким образом, из проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Изменение глубины резания для всех рассмотренных рабочих моделей параметрической оптимизации, за исключением модели, когда активным является ограничение по  $[Rz]$ , существенно влияет на оптимальные значения параметров режима.

2. Для условий ограничения  $[Pz]$ ,  $[Px]$ ,  $[Py]$ ,  $[N]$ , характер зависимости оптимальных режимов обработки от изменения глубины является непрерывным. А для ограничения  $[Rz]$  характер этой зависимости - дискретный, т.е. колебание глубины резания в широком диапазоне (до 60%) обуславливает незначительное изменение оптимальных параметров режима - до 10%.

3. Для всех рассмотренных условий ограничения, характер зависимости оптимальных режимов обработки от колебания твердости является непрерывным.

#### ლიტერატურა-ЛИТЕРАТУРА-REFERENCES

1. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках.-М.:Машиностроение, 1982.-208с.
2. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов.-М.:Высшая школа,1985.-303с.

3. Oxley P.L.B. Modelling Machining Processes with a view to their optimization and to the adaptive control of metal cutting machine tools //Rob. and Comput. - Integr. Manuf.- 1988, vol.4, no.1/2.-p.103-119.

Центр оптимизации  
при кафедре технологии  
машиностроения

Поступила в редакцию  
19.11.1993