

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ОСНОВЫ ПОД НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЯ

*С.Л. ЛЕОНОВ, доктор техн. наук, профессор
Е.Ю. ТАТАРКИН, доктор техн. наук, профессор
Р.А. АНЗЫРЯЕВ, аспирант
(АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)*

Поступила 23 июля 2014
Рецензирование 21 августа 2014
Принята к печати 29 августа 2014

Леонов С.Л. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Подготовка поверхности под нанесение покрытия подразумевает создание определенной шероховатости основы. Это необходимо для обеспечения необходимой прочности сцепления. Обработка основы и создает на ее поверхности микрорельеф, увеличивающий эту площадь и соответственно прочность сцепления. Высокая удельная стоимость материала некоторых покрытий существенно ограничивает его толщину. При этом основным критерием становится стоимость объема наносимого слоя покрытия, в том числе и расположенного в рисках шероховатости основы. В статье приведена постановка задачи оптимизации операций механической обработки основы для обеспечения максимальной площади контакта с покрытием и минимального расхода материалов с учетом стохастических характеристик геометрии инструмента. Описанная методика позволяет на этапе технологического проектирования оптимизировать операции механической обработки основы для обеспечения максимальной площади контакта с покрытием и минимального расхода материалов с учетом стохастических характеристик геометрии инструмента.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, шероховатость, плотность распределения.

Введение

Подготовка поверхности под нанесение покрытия подразумевает создание определенной шероховатости основы. Это необходимо для обеспечения необходимой прочности сцепления. Нагрузки, приводящие к отслаиванию, пропорциональны площади контакта покрытия с основой. Обработка основы и создает на ее поверхности микрорельеф, увеличивающий эту площадь и соответственно прочность сцепления. Высокая удельная стоимость материала некоторых покрытий существенно ограничивает его толщину. При этом основным критерием становится стоимость объема наносимого слоя покрытия, в том числе и расположенного в рисках шероховатости основы.

Следовательно, при создании развитого микрорельефа поверхности для обеспечения проч-

ности сцепления основы с покрытием и увеличении высоты слоя шероховатости основы значительная часть покрытия может располагаться в рисках шероховатости. Поэтому микрорельеф основы неоднозначно влияет на эксплуатационные свойства покрытия.

Таким образом, для повышения эффективности операций подготовки основы необходимо:

- 1) для снижения расхода материала покрытия – минимизировать его объем, размещаемый в микрорельефе поверхности основы;
- 2) для предотвращения отслаивания покрытия и обеспечения заданного ресурса ее работы – обеспечить развитый микрорельеф поверхности основы – максимум площади контакта покрытия с основой;
- 3) для увеличения прочности сцепления покрытия необходимо выдерживать заданную тол-

щину покрытия по максимуму и минимуму и ограничить максимальную величину шероховатости основы.

Теория

Математически первое требование выражается условием

$$V_{\Pi} = \int_0^{C_g} \int_0^{L_g} [y_{\max} - y(l, c)] dl dc \rightarrow \min, \quad (1)$$

где L_g , C_g задают базовый участок на поверхности основы; V_{Π} – объем покрытия, размещаемый в микрорельефе поверхности основы; $y_{\max}$ – координата максимального выступа профиля основы; $y(l, c)$ – зависимость, описывающая топографию поверхности основы.

Второе требование – максимум площади контакта – определяется условием

$$S_{\Pi} = \int_0^{C_g} \int_0^{L_g} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial l}\right)^2\right] \times \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial c}\right)^2\right] - \left(\frac{\partial y}{\partial l} \frac{\partial y}{\partial c}\right)^2} dl dc \rightarrow \max. \quad (2)$$

В зависимости (2) также используется топография поверхности $y(l, c)$.

Система ограничений (на максимальную величину шероховатости и минимально допустимую площадь контакта покрытия с основой) в математическом выражении имеет вид

$$Ra(y) \leq Ra_{\text{доп}}, \quad (3)$$

$$\int_0^{C_g} \int_0^{L_g} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial l}\right)^2\right] \times \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial c}\right)^2\right] - \left(\frac{\partial y}{\partial l} \frac{\partial y}{\partial c}\right)^2} dl dc \geq S_{\Pi \text{ min}}. \quad (4)$$

В связи с тем что топография поверхности в настоящее время не нашла достаточного применения, логично выразить критерии (1) и (2), а также ограничения (3), (4) через характеристики профиля поверхности. При переходе от объемных (топографических) параметров к параметрам профиля поверхности критерии значительно упрощаются и принимают вид

$$S_{\text{сп}} = \int_0^{L_{\text{баз}}} (y_{\max} - y(l)) dl \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$L = \int_0^{L_{\text{баз}}} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dl}\right)^2} dl \rightarrow \max, \quad (6)$$

где $y(l)$ – зависимость, описывающая профиль поверхности основы; $L_{\text{баз}}$ – базовая длина.

Аналогично упрощается и ограничение (4):

$$\int_0^{L_{\text{баз}}} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dl}\right)^2} dl \geq L_{\text{min}}. \quad (7)$$

Таким образом, для проектирования технологического процесса механической обработки основы под нанесения покрытия ставится оптимизационная задача в одном из двух вариантов – в объемной (топографической) постановке: критерии (1), (2) с ограничениями (3) и (4) или плоской: критерии (5), (6) с ограничениями (3) и (7).

Критерии (1), (2), (5) и (6) имеют различную размерность. Для их сравнения и реализации алгоритмов оптимизации удобнее перейти к безразмерным параметрам. Например, для критериев (1) и (2) выражения будут иметь вид

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{\Pi} &= \frac{1}{C_g L_g y_{\max}} \int_0^{C_g} \int_0^{L_g} [y_{\max} - y(l, c)] dl dc \rightarrow \min; \\ \tilde{S}_{\Pi} &= \frac{1}{C_g L_g} \int_0^{C_g} \int_0^{L_g} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial l}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{\partial y}{\partial c}\right)^2\right] - \left(\frac{\partial y}{\partial l} \frac{\partial y}{\partial c}\right)^2} dl dc \rightarrow \max. \end{aligned} \quad (8)$$

Для критериев (5) и (6) выражения принимают вид:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{\text{сп}} &= \frac{1}{L_{\text{баз}} y_{\max}} \int_0^{L_{\text{баз}}} (y_{\max} - y(l)) dl \rightarrow \min; \\ \tilde{L} &= \frac{1}{L_{\text{баз}}} \int_0^{L_{\text{баз}}} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dl}\right)^2} dl \rightarrow \max. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения безразмерных критериев (8) и (9) находятся в пределах 0...1.

Задача оптимизации усложняется, тем, что топография (профиль) поверхности имеет стохастические характеристики. В этом случае и критерии оптимальности, и ограничения имеют случайный разброс и становятся случайными величинами.

Обозначим плотности распределения:

$f_1(\tilde{V}_\Pi)$ – безразмерного объема покрытия в рисках шероховатости;

$f_2(\tilde{S}_\Pi)$ – безразмерной площади контакта покрытия с основой;

$f_3(Ra)$ – параметра шероховатости.

С учетом этих плотностей распределения задача оптимизации принимает вид задачи стохастической оптимизации:

$$F_1 = \int_0^1 \tilde{V}_\Pi f_1(\tilde{V}_\Pi) d\tilde{V}_\Pi \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$F_2 = \int_0^1 \tilde{S}_\Pi f_2(\tilde{S}_\Pi) d\tilde{S}_\Pi \rightarrow \max;$$

$$\int_0^1 f_2(\tilde{S}_\Pi) d\tilde{S}_\Pi \leq P_1; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \int_{Ra_{\max}}^{\infty} f_3(Ra) dRa = \\ & = 1 - \int_0^{Ra_{\max}} f_3(Ra) dRa \leq P_2. \end{aligned} \quad (12)$$

Ограничение (11) задает обеспечение минимально допустимой площади контакта покрытия с основой, а ограничение (12) – предельно допустимую шероховатость основы. Вероятности P_1 и P_2 определяют вероятность появления брака по невыполнению этих ограничений.

При решении задачи в плоской постановке при использовании профиля поверхности основы критерии оптимальности принимают вид

$$F_1 = \int_0^1 \tilde{S}_{\text{сп}} f_1'(\tilde{S}_{\text{сп}}) d\tilde{S}_{\text{сп}} \rightarrow \min; \quad (13)$$

$$F_2 = \int_0^1 \tilde{L} f_2'(\tilde{L}) d\tilde{L} \rightarrow \max.$$

Ограничение (11) преобразуется к виду

$$\int_0^1 f_2'(\tilde{L}) d\tilde{L} \leq P_1. \quad (14)$$

Фактически критерии оптимальности (10) и (13) используют при оптимизации функции распределения как весовые функции. Эти выражения определяют математические ожидания случайных величин с учетом их плотностей рас-

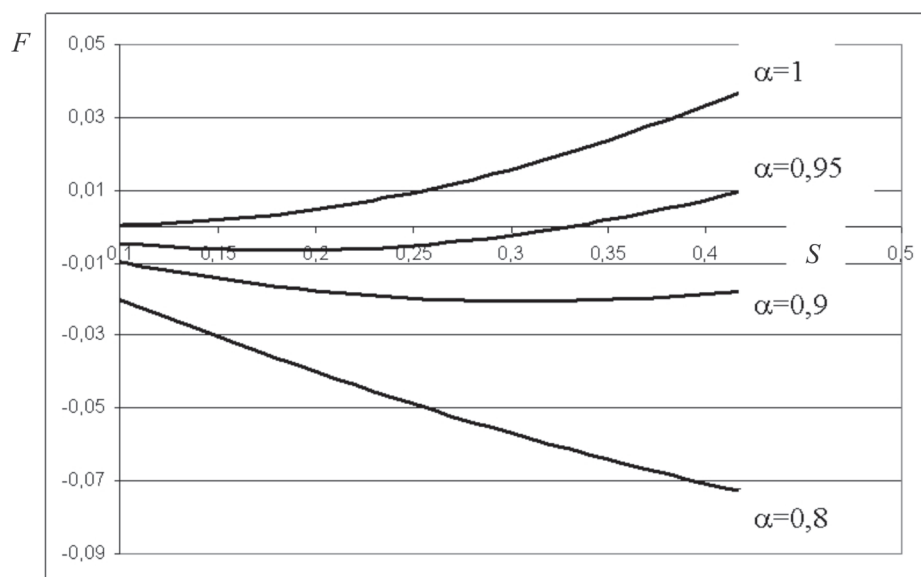
пределения. Возможно выражение в безразмерной форме и ограничения (12).

В связи с наличием двух критериев оптимальности классическое решение задачи невозможно и необходимо сведение задачи к однокритериальной. Для этого существует два стандартных подхода. Первый заключается в формировании свертки $F = \alpha F_1 - (1 - \alpha) F_2$, где α – весовой коэффициент ($0 \leq \alpha \leq 1$).

Второй подход заключается в перенесении одного из критериев в область ограничений. При этом выбирается обычно менее важный критерий. Например, перенос критерия F_2 приводит к исключению его и появлению ограничения типа $F_2 \geq F_{2\text{доп}}$. Здесь неопределенность остается в виде неизвестного параметра $F_{2\text{доп}}$.

Результаты и обсуждение. В качестве примера использования описанной методики рассмотрим наружное точение стали 40Х, диаметр детали 40 мм. Геометрия инструмента: $\varphi = 45^\circ \pm 2^\circ$; $\varphi_1 = 45^\circ \pm 2^\circ$; $r = 0,15 \dots 0,2$ мм; $V = 60$ м/мин. Параметр оптимизации – подача S . Для набора значений подачи $S = 0,05 \dots 1,2$ мм/об с учетом случайного колебания φ , φ_1 , r с помощью имитационной модели получены реализации профилей, а по ним рассчитаны значения параметров $\tilde{S}_{\text{сп}}$, $\tilde{L}$ и Ra . Для получения стохастических характеристик вычисления производились 150 раз при случайных значениях параметров геометрии инструмента. Затем строилась гистограмма распределения параметров Ra , $\tilde{L}$ и $\tilde{S}_{\text{сп}}$. Для оптимизации принято: $P_1 = P_2 = 0,05$ (вероятность брака не более 5 %), $Ra_{\max} = 0,04$ мм. Из ограничений найден допустимый диапазон изменения подачи: $0,16 \leq S \leq 0,41$ мм/об. На рисунке приведены графики зависимости свертки F от подачи при различных значениях весового коэффициента α . Из анализа графиков видно, что оптимальное значение подачи может находиться как на границе допустимой области, так и внутри ее. Например, при $\alpha = 0,8$ и менее оптимальное значение подачи соответствует правой границе: $S = 0,41$ мм/об; при $\alpha = 0,9$ оптимальная подача $S = 0,31$ мм/об; при $\alpha = 0,95$ оптимальная подача $S = 0,199$ мм/об; при $\alpha = 1$ оптимальная подача соответствует левой границе допустимой области: $S = 0,16$ мм/об.

Возможность изменения весового коэффициента α дает возможность «маневра» при техно-



Зависимость свертки F от подачи S при различных значениях весового коэффициента α

логическом проектировании, позволяя при необходимости акцентировать внимание на площади контакта покрытия с основой или на остаточном объеме покрытия (например, при его высокой стоимости).

Выводы

Таким образом, для повышения эффективности операций подготовки основы необходимо:

1) для снижения расхода материала покрытия – минимизировать его объем, размещаемый в микрорельефе поверхности основы;

2) для предотвращения отслаивания покрытия и обеспечения заданного ресурса ее работы – обеспечить развитый микрорельеф поверхности основы – максимум площади контакта покрытия с основой;

3) для увеличения прочности сцепления покрытия необходимо выдерживать заданную толщину покрытия по максимуму и минимуму и ограничить максимальную величину шероховатости основы.

Описанная методика позволяет на этапе технологического проектирования оптимизировать операции механической обработки основы для обеспечения максимальной площади контакта с покрытием и минимального расхода материалов с учетом стохастических характеристик геометрии инструмента.

Список литературы

1. Леонов С.Л., Зиновьев А.Т. Основы создания имитационных технологий прецизионного формообразования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. – 198 с.
2. Ситников А.А. Технологическое обеспечение точности изготовления деталей с покрытиями. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 198 с.
3. Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
4. Жуков Ю.Н., Черепанов А.В. Выбор критерия обрабатываемости лезвийным инструментом композиционной керамики // Конструирование и технология изготовления машин: сб. тр. УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 1995. – С. 124.
5. Клименко С.А. Технологическое обеспечение шероховатости поверхности наплавленных деталей точением СТМ // Технологическое обеспечение повышения качества и долговечности деталей машин и механизмов: сб. науч. тр. – Брянск, 1984. – С. 89–92.
6. Кулагин С.П., Леонов С.Л. Моделирование формирования микрорельефа напыленных покрытий при шлифовании // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты автоматизированных производств: межвуз. сб. – Барнаул, 1989. – С. 98–103.
7. Соколов И.К., Еремичев А.Н. Влияние способа подготовки напыленной поверхности на прочность сцепления газотермического покрытия с основой // Порошковая металлургия. – 1993. – № 2. – С. 13–15.
8. Татаркин Е.Ю. Точность обработки с позиций системного анализа // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты автоматизированных про-

изводств: межвуз. сб. / Алт. политехн. ин-т. – Барнаул, 1989. – С. 83–90.

9. Татаркин Е.Ю., Федорова Н.П., Ситников А.А. Определение межоперационных размеров при изготовлении деталей с покрытиями // Сварочное производство. – 1991. – № 12. – С. 5–6.

10. Эрманттраут М.М. О расчете равномерности напыленных покрытий // Сварочное производство. – 1971. – № 3. – С. 35–37.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(64), July – September 2014, Pages 76–81

Stochastic optimization during preparation of the basis for the coating

Leonov S.L., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: sergey_and_nady@mail.ru

Tatarkin E.Y., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: etatarkin@mail.ru

Anzyryaev R.A., Post-graduate Student, e-mail: kubonit@mail.ru

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

Surface preparation for coating involves the creation of a certain roughness of the substrate. This is necessary to ensure proper adhesion. Substrate processing generates a surface microrelief, that increases the substrate surface and the adhesion strength. A high unit cost of some coatings materials substantially limits its thickness. In this case, the main criterion is the cost of the coating layer volume, including the material in the scratches of the substrate. The formulation of the problem of substrate machining operations optimization to maximize the area of the contact with the coating and minimal consumption of materials, taking into account the stochastic characteristics of the tool geometry is described in the paper. The described method allows on the design stage to optimize substrate technological machining operations to maximize the area of contact with the coating and the minimum consumption of materials, taking into account the stochastic characteristics of the tool geometry.

Keywords:

Multiobjective optimization, roughness, density distribution

References

1. Leonov S.L., Zinov'ev A.T. *Osnovy sozdaniya imitatsionnykh tekhnologii pretsizionnogo formoobrazovaniya* [Basis for the creation of simulation precision shaping technology]. Barnaul, AltSTU Publ., 2006. 198 p.
2. Sitnikov A.A. *Tekhnologicheskoe obespechenie tochnosti izgotovleniya detalei s pokrytiyami* [Technological support of manufacturing precision parts with coatings]. Barnaul, AltSTU Publ., 2004. 198 p.
3. Dunin-Barkovskii I.V., Kartashova A.N. *Izmerenie i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti* [Measurement and analysis of roughness, waviness and roundness surface]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 232 p.
4. Zhukov Yu.N., Cherepanov A.V. [Choice of the criterion workability edge tool composite ceramics]. *Sbornik trudov UGTU-UI «Konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya mashin»* [Proceedings of the USTU – UPI “Design and technology of manufacturing machines”]. Yekaterinburg, 1995, pp. 124 (in Russian).
5. Klimenko S.A. [Technological support of the surface roughness of deposited parts in turning superhard materials]. *Sbornik nauchnykh trudov «Tekhnologicheskoe obespechenie povysheniya kachestva i dolgovechnosti detalei mashin i mekhanizmov»* [Collection of scientific papers “Technological support of improving the quality and durability of machine parts and mechanisms”]. Bryansk, 1984, pp. 89-92 (in Russian).
6. Kulagin S.P., Leonov S.L. [Simulation of the microrelief sprayed coatings by grinding]. *Mezhvuzovskii sbornik «Otdelochno-chistovyye metody obrabotki i instrumenty avtomatizirovannykh proizvodstv»* [Interuniversity collection “Finishing-finishing processing methods and tools automated production”]. Barnaul, 1989, pp. 98-103 (in Russian).

7. Sokolov I.K., Eremichev A.N. Vliyanie sposoba podgotovki napylennoi poverkhnosti na prochnost' stsepleniya gazo-termicheskogo pokrytiya s osnovoi [Influence of the preparation on the sprayed surface adhesion strength of gas-thermal coating to the substrate]. *Poroshkovaya metallurgiya – Powder Metallurgy*, 1993, no. 2, pp. 13-15 (in Russian).

8. Tatarkin E.Yu. [Precision machining with the position of system analysis]. *Mezhvuzovskii sbornik «Otdelochno-chistovye metody obrabotki i instrumenty avtomatizirovannykh proizvodstv»* [Interuniversity collection "Finishing-finishing processing methods and tools automated production"]. Barnaul, 1989, pp. 83-90.

9. Tatarkin E.Yu., Fedorova N.P., Sitnikov A.A. Opredelenie mezhoperatsionnykh razmerov pri izgotovlenii detalei s pokrytiyami [Definition of interoperable sizes to produce parts with coatings]. *Svarochnoe Proizvodstvo – Welding International*, 1991, no. 12, pp. 5-6.

10. Ermanttraut M.M. O raschete ravnomernosti napylennykh pokrytii [On calculation of the uniformity of the deposited coatings]. *Svarochnoe Proizvodstvo – Welding International*, 1971, no. 3, pp. 35-37.

Received 23 July 2014

Revised 21 August 2014

Accepted 29 August 2014