

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ ФОРМИРУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ НАКАТЫВАНИИ ШАРИКОМ

А.А. Новичков

classic694@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен способ расчета определения высоты формируемой шероховатости при накатывании шариком на базе машинного эксперимента. В ходе машинного эксперимента не требуется измерение шероховатости непосредственно на детали, расчеты произведены с помощью теоретического уравнения с дальнейшим кодированием исходных данных и составлением матрицы. На основании полученных результатов представлено эмпирическое уравнение взаимосвязи исследуемых параметров

Ключевые слова

Поверхностное пластическое деформирование, машинный эксперимент, формируемая шероховатость поверхности, коэффициенты регрессии

Поступила в редакцию 11.04.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Сущность машинного эксперимента заключается в том, что в зависимости от задачи выбирают теоретическое уравнение расчета исследуемого параметра, определяют границы исследуемых факторов и производят их кодирование. Все остальные входные факторы принимают определенные значения, соответствующие конкретному решению задач. Далее составляют матрицу планирования эксперимента для исследования входных данных и в соответствии с этой матрицей рассчитывают по принятому теоретическому уравнению значение исследуемого параметра для каждого опыта, затем определяют коэффициенты регрессии и получают эмпирическое уравнение взаимосвязи исследуемого параметра и входными факторами [1].

Под накатыванием понимают поверхностное пластическое деформирование (ППД) при качении инструмента по поверхности деформируемого материала [2]. После обработки ППД уменьшается шероховатость поверхности, возникает деформационное упрочнение и изменение структуры материала поверхностного слоя, образование определенной микрогеометрической формы [3, 4].

В зависимости от назначения и пластических деформаций методы можно разделить на три класса:

- 1) отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием;
- 2) формообразующая обработка пластическим деформированием;
- 3) отделочно-упрочняющая обработка пластическим деформированием.

Среди методов отделочно-упрочняющей обработки ППД наиболее широкое применение имеет накатывание роликами или шариками. Накатыванием поверхностей металлическими роликами и шариками можно обеспечить высокую чистоту поверхности (до 10-го класса) и точность обработки (до 2-го класса).

Деформирующий элемент прижимается к детали, которая совершает вращение вокруг своей оси при накатывании цилиндрических поверхностей (рис. 1).

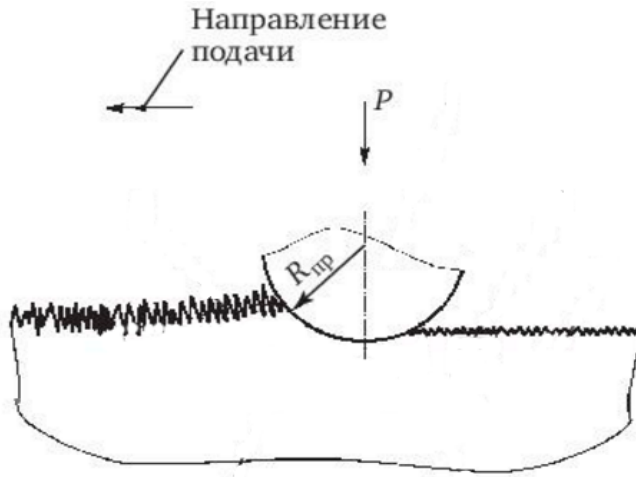


Рис. 1. Взаимодействие деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью:

P — рабочее усилие; $R_{гр}$ — приведенный радиус

От выбранных параметров накатывания зависит интенсивность пластической деформации поверхностного слоя и, как следствие, качественные изменения в нем: снижение шероховатости поверхности, повышение твердости, предела текучести металла, возникновение сжимающих остаточных напряжений и т. д. (рис. 2). Величину силы вдавливания шарика выбирают в зависимости от цели обработки.

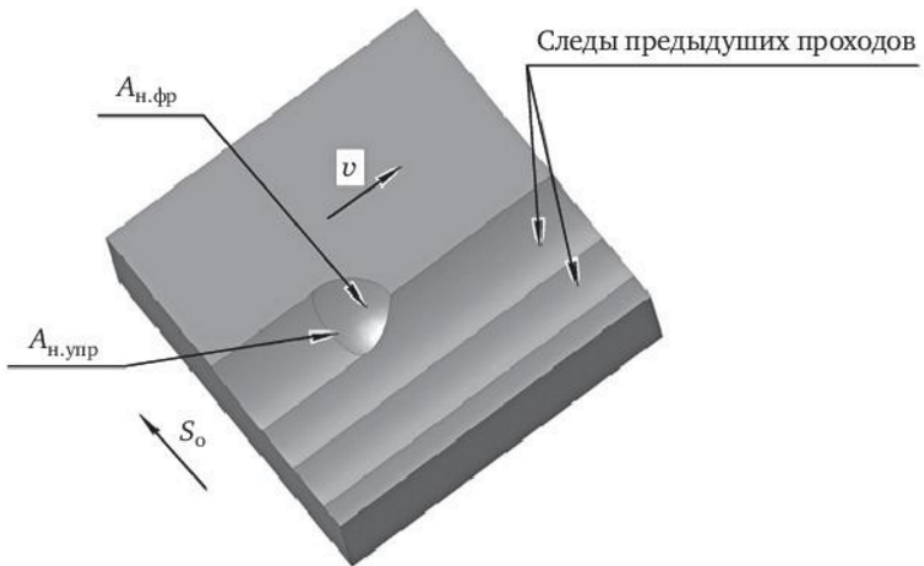


Рис. 2. Общий вид площадки контакта при отделочно-упрочняющей обработке ППД шариком на отделочных и отделочно-упрочняющих режимах

Методы накатывания, по сравнению с обработкой резанием, имеют ряд преимуществ [5]:

- отсутствие термических дефектов в поверхностном слое деталей;
- сохранение целостности волокон металла и образование мелкозернистой структуры;
- достижение минимального значения шероховатости поверхности до Ra 0,05–0,1, уменьшение шероховатости поверхности в несколько раз за один рабочий ход;
- деформационное упрочнение поверхностного слоя;
- повышение микротвердости поверхности;
- технологическая надежность и экономичность;
- простота конструкции и универсальность обкатных устройств.

Анализируя литературу по обозначенной проблеме, находим теоретические зависимости для расчета высоты шероховатости Rz при накатывании шариком [6]. Далее задаем значения входных факторов:

$$P_{\max} = 600 \text{ МПа}; P_{\min} = 400 \text{ МПа}; S_{\max} = 0,4 \frac{\text{мм}}{\text{об}}; S_{\min} = 0,2 \frac{\text{мм}}{\text{об}};$$

$$R_{\max} = 5 \text{ мм}; R_{\min} = 4 \text{ мм}; Rz_{\text{исх max}} = 20 \text{ мкм}; Rz_{\text{исх min}} = 10 \text{ мкм}.$$

Затем также с помощью [6] находим теоретические зависимости для расчета высоты шероховатости Rz . Для обработки накатыванием отделочно-упрочняющей обработки ППД формула будет иметь следующий вид:

$$Rz = Rz_{\text{исх}} - R_{\text{рисх}} \left\{ \frac{150P(1+f^2)^{0,5}}{\pi R_{\text{пр}} t_{\text{м исх}} H_{\mu}} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{S - a_{\text{пл}}}{a_{\text{пл}}}\right)}{180} (h_{\text{кин}} - h_{\text{уп}}) + 2h_{\text{уп}} \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{PR_{\text{рисх}}^2}{\pi R_{\text{пр}} (HB_{\max} - HB_{\min})} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{S}{2r} + Rz_{\text{исх}},$$

где $Rz_{\text{исх}}$, $R_{\text{рисх}}$, $t_{\text{м исх}}$ — исходные параметры шероховатости; P — рабочее усилие; f — коэффициент трения между инструментом и обрабатываемой заготовкой; $R_{\text{пр}}$ — приведенный радиус; R — радиус шарика; $a_{\text{пл}}$ — средний радиус площадки контакта.

Далее производим кодирование исследуемых факторов:

$$X_1 = \frac{2S - S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}};$$

$$X_2 = \frac{2R - R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}};$$

$$X_3 = \frac{2P - P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}};$$

$$X_4 = \frac{2Rz_{\text{исх}} - Rz_{\text{исх max}} - Rz_{\text{исх min}}}{Rz_{\text{исх max}} - Rz_{\text{исх min}}}.$$

Поскольку количество входных данных равно четырем, то для составления матрицы планирования, выбираем метод дробного факторного эксперимента [7]. Количество испытаний для данного вида эксперимента определим по формуле $N = q^{n-1}$, где n — количество входных данных. Подставим имеющиеся значения в формулу, тогда получим $N = 2^{4-1} = 8$, то есть количество экспериментов будет равно восьми (см. матрицу ниже).

Матрица планирования экспериментов

Номер эксперимента п/п	X_1	X_2	X_3	X_4
1	+	+	+	+
2	-	+	+	-
3	+	-	+	-
4	-	-	+	+
5	+	+	-	-
6	-	+	-	+
7	+	-	-	+
8	-	-	-	-

Далее определим для каждого эксперимента высоту получаемой шероховатости, подставляя максимальные и минимальные значения входных факторов, исходя из матрицы планирования экспериментов:

$$1) Rz = 0,02 - 0,008 \left\{ \frac{150 \times 600 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 4000 \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,4 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right]} \right\}^{0,5} + \left[\frac{600 \times 0,008^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,4}{2 \times 5} + 0,02 = 0,0112 \text{ мм.}$$

$$2) R_z = 0,01 - 0,004 \left\{ \frac{150 \times 600 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 4000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,2 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{600 \times 0,004^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,2}{2 \times 5} + 0,01 = 0,0091 \text{ мм};$$

$$3) R_z = 0,01 - 0,004 \left\{ \frac{150 \times 600 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 4000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,4 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{600 \times 0,004^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,4}{2 \times 4} + 0,01 = 0,0096 \text{ мм};$$

$$4) R_z = 0,02 - 0,008 \left\{ \frac{150 \times 600 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 4000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,2 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{600 \times 0,008^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,2}{2 \times 4} + 0,02 = 0,0101 \text{ мм};$$

$$5) R_z = 0,01 - 0,004 \left\{ \frac{150 \times 400 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 4000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,4 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{400 \times 0,004^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,4}{2 \times 5} + 0,01 = 0,00645 \text{ мм};$$

$$6) R_z = 0,02 - 0,008 \left\{ \frac{150 \times 400 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 4000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,2 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{400 \times 0,008^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,2}{2 \times 5} + 0,02 = 0,0072 \text{ мм};$$

$$7) R_z = 0,02 - 0,008 \left\{ \frac{150 \times 400 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 5000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,4 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{400 \times 0,008^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,4}{2 \times 4} + 0,02 = 0,0075 \text{ мм};$$

$$8) R_z = 0,01 - 0,008 \left\{ \frac{150 \times 400 (1 + 0,07^2)^{0,5}}{3,14 \times 2,5 \times 0,8 \times 5000} \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{0,2 - 0,4}{0,4}\right)}{180} (0,022 - 0,003) + 2 \times 0,003 \right] \right\}^{0,5} + \left[\frac{400 \times 0,008^2}{3,14 \times 2,5 (197 - 156)} \right]^{\frac{1}{3}} + \frac{0,2}{2 \times 4} + 0,01 = 0,0061 \text{ мм};$$

В общем виде запишем следующее линейное уравнение:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + \dots,$$

где x_1, x_2, x_3, x_4 — кодированное значение входных факторов; b_0 — входной фактор.

Формула для расчета значения регрессии имеет вид:

$$b = \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{N}.$$

Таким образом, $b_0 = 0,00841$; $b_1 = 0,00028$; $b_2 = 0,00008$; $b_3 = 0,00159$; $b_4 = 0,00058$.

Подставим полученное значение регрессий в уравнение y и получим эмпирическое уравнение взаимосвязи исследуемого параметра с входными факторами:

$$\begin{aligned} Rz = y &= 0,00841 + 0,00028 \left(\frac{2S - 0,4 - 0,2}{0,4 - 0,2} \right) + 0,00008 \left(\frac{2R - 5 - 4}{5 - 4} \right) + \\ &+ 0,00159 \left(\frac{2P - 600 - 400}{600 - 400} \right) + 0,00058 \left(\frac{2Rz_{исх} - 0,02 - 0,01}{0,02 - 0,01} \right) = \\ &= 0,0028S + 0,00016R + 0,000159P + 0,0000116Rz - 0,00284. \end{aligned}$$

В заключение отметим, что при обработке накатыванием шариком необходимо учитывать следующие положения:

- увеличение силы давления шарика на поверхность увеличивает величину шероховатости;
- увеличение диаметра шарика приводит к уменьшению шероховатости поверхности;
- при увеличении подачи накатного инструмента увеличивается высота шероховатости;
- при увеличении значения исходной шероховатости обрабатываемой поверхности значение Rz возрастает.

Проведенные результаты показали, что на высоту формируемой шероховатости при накатывании шариком наибольшее влияние оказывает сила давления деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность.

Литература

1. Сулов А.Г., ред. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием. В 2-х томах. Т. 1. М.: Машиностроение, 2014. 480 с.
2. Сулов А.Г., Браун Э.Д., Виткевич Н.А. Качество машин: Справочник. В 2 т. Т. 1. М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
3. Дальский А.М., Косилова А.Г., Мещеряков Р.К., Сулов А.Г., ред. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 1. М.: Машиностроение. 2001. 912 с.
4. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом // Серия «Выдающиеся ученые ИТМО». СПб: СПб ГИТМО, 2001. 264 с.
5. Сулов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
6. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
7. Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 319 с.

Новичков Александр Алексеевич — магистрант кафедры «Технологии машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

DETERMINING THE ROUGHNESS AMPLITUDE FORMED BY BALL BURNISHING

N.A. Novichkov

classic694@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

We consider a way of computationally determining the roughness amplitude formed by ball burnishing in a numerical experiment. We do not have to measure the roughness of the part directly during the numerical experiment; we performed the computations using a theoretical equation, then encoded the input data and prepared a matrix. We present an empirical equation based on the results obtained, which shows the relation between the parameters under study

Keywords

Burnishing, numerical experiment, resulting surface roughness, regression coefficient

© Bauman Moscow State Technical University, 2017

References

- [1] Suslov A.G., ed. Tekhnologiya i instrumenty otdelchno-uprochnyayushchey obrabotki detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. T. 1 [Technology and instruments for finishing strengthening parts treatment by means of surface plastic deformation. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie, 2014. 480 p. (in Russ.)
- [2] Suslov A.G., Braun E.D., Vitkevich N.A. Kachestvo mashin. T. 1 [Machines quality. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 256 p. (in Russ.)
- [3] Dal'skiy A.M., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G., eds. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya. T. 1 [Handbook of mechanic engineer technologist. Vol. 1]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001. 912 p. (in Russ.)
- [4] Shneyder Yu.G. Ekspluatatsionnye svoystva detaley s regul'yarnym mikrorel'yefom [Serviceability of the parts with regular micro-relief]. Seriya «Vydayushchiesya uchenye ITMO» [Ser. Outstanding ITMO scientists]. Sankt-Petersburg, SPb GITMO Publ., 2001. 264 p. (in Russ.)
- [5] Suslov A.G., Dal'skiy A.M. Nauchnye osnovy tekhnologii mashinostroeniya [Scientific basis of mechanical-engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie, 2002. 684 p. (in Russ.)
- [6] Papshev D.D. Otdelchno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem [Finishing strengthening treatment by surface plastic deformation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 152 p. (in Russ.)
- [7] Suslov A.G. Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin [Facial layer quality of machinery parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2000. 319 p. (in Russ.)

Novichkov A.A. — Master's Degree student, Department of Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.