

В. А. Огородов

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ХОНИНГОВАНИЯ

Приведены результаты комплексных исследований процесса алмазного хонингования с помощью имитационной модели, основанной на дискретном представлении обрабатываемой поверхности, проверки адекватности разработанной модели экспериментальным данным, полученным независимым источником, включающее изучение влияния на результаты расчетов как параметров самой модели, так и различных технологических факторов. *Хонингование; повышение точности; имитационная модель; адекватность модели; некруглость; исправляющая способность; износ брусков; радиальное биение брусков; деформация детали*

Повышение точности обработки отверстий остается одной из актуальнейших задач машиностроения. Для ее решения на операции хонингования в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6 и др.] рассмотрены различные аналитические модели, область применения которых ограничена принятыми в них допущениями.

При этом известно, что большими возможностями для изучения процессов различной природы обладают их численные модели, однако к настоящему моменту времени в области хонингования такие модели отсутствуют.

В связи с этим автором разработана численная модель процесса хонингования, имитирующая формообразование обрабатываемого отверстия. В основу этой имитационной модели положено дискретное представление обрабатываемой поверхности (рис. 1, а) в виде множества смежных участков прямоугольной формы числом $n \times m$ (где n – дискретность поверхности вдоль окружности отверстия, m – дискретность вдоль оси отверстия). В пределах каждого дискретного участка все свойства поверхности, включая величину отклонения формы, принимаются постоянными.

Хонинговальный брусок также представляется дискретным множеством режущих элементов, называемых в дальнейшем «зернами» (рис. 1, а), поскольку они имитируют процесс съема припуска с обрабатываемой поверхности. Свойства этих зерен описываются комплексом параметров, определяемых решаемой задачей моделирования. В частности, в состав параметров входят режущая способность и износ зерна, значения которых индивидуальны для каждого зерна. Расположение зерен отвечает их наиболее равномерному [7] распределению в пределах поверхности бруска. В соответствии с работой [6] их число можно принять пропорцио-

нальным концентрации алмазосодержащего слоя.

В процессе хонингования все зерна совершают возвратно-поступательное движение, снижая припуск с обрабатываемой поверхности. Кинематическая схема движения за один двойной ход применительно только к двум зернам различных брусков приведена на рис. 1, а. Поскольку в пределах одного дискретного участка поверхности все его свойства приняты одинаковыми, то при прохождении зерна через каждый участок считаем, что происходит съем припуска по всему этому участку. Очевидно, что уменьшение размеров участка поверхности до реальных размеров алмазного зерна приведет к наиболее точному моделированию съема припуска, но при этом значительно возрастет трудоемкость расчетов. В этой связи в качестве первоначального приближения можно принять размеры дискретного участка соизмеримыми с шириной хонинговального бруска.

Величина снятого одним зерном припуска Δ_{ij}^k в пределах каждого ij -го участка обрабатываемой поверхности при одном проходе принимается пропорциональной длине dS_{ij} пройденного им пути по этому участку и величине радиального усилия резания Q_k , приходящегося на него в пределах соответствующего участка, (рис. 1, б)

$$\Delta_{ij}^k = C_z^k dS_{ij} Q_k, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где C_z^k – коэффициент пропорциональности, численно равный величине съема припуска k -м зерном на единичной длине пути резания единичной радиальной силой $Q_k = 1$; N – суммарное число зерен по всем брускам. При этом усилия Q_k ($k = 1, 2, \dots, N$) являются результатом контактного взаимодействия хонинговальных брусков с обрабатываемой поверхностью.

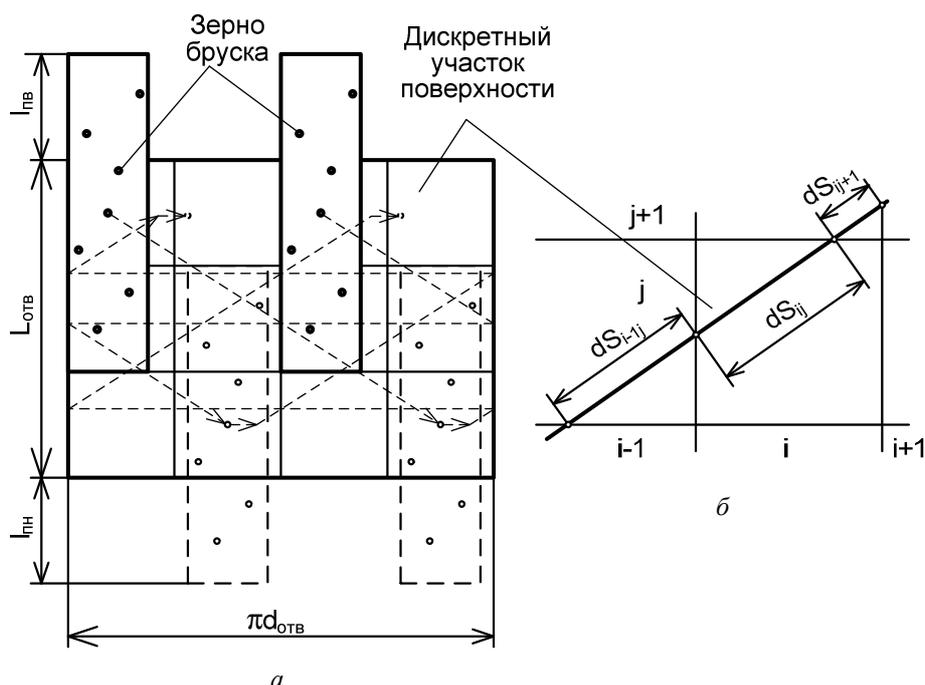


Рис. 1. Дискретное представление обрабатываемой поверхности (а) и схема для расчета сьема припуска (б)

По данным работы [6] контакт между бруском и деталью можно считать упругим, поэтому условие совместности деформаций брусков и обрабатываемой детали в непрерывных функциях имеет следующий вид:

$$W(x) + V(x) = S_p. \quad (2)$$

здесь $W(x)$ – неизвестная величина упругого радиального отжатия обрабатываемой детали под действием усилия прижима бруска; $V(x)$ – неизвестная величина упругой деформации контактного слоя «брусок-обрабатываемая поверхность»; S_p – радиальная подача бруска.

Число неизвестных в выражении (2) можно уменьшить, если функции $W(x)$ и $V(x)$ с помощью интегральных уравнений 1-го рода выразить через одну неизвестную функцию радиальных сил резания $Q(x)$, а именно

$$W(x) = \int_a^b \Phi(x, \xi) Q(\xi) d\xi, \quad (3)$$

где $\Phi(x, \xi)$ – функция влияния, представляющая собой деформацию обрабатываемой детали в сечении x под действием единичной нагрузки $Q(\xi)d\xi = 1$, приложенной в сечении ξ ; a и b – сечения детали, определяющие положение брусков относительно обрабатываемой поверхности;

$$V(x) = \int_a^b \Pi(x, \xi) Q(\xi) d\xi, \quad (4)$$

здесь $\Pi(x, \xi)$ – функция влияния для контакта «брусок-обрабатываемая поверхность».

При дискретном представлении обрабатываемой поверхности выражение (2) заменой интегралов конечной суммой также приводится к дискретной форме в виде следующей системы линейных уравнений относительно неизвестных сил Q_k

$$\sum_{l=1}^N (\Phi_{lk} + \Pi_{lk}) Q_k = S_p, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

Решение системы (5) позволяет рассчитать искомые величины сил Q_k при дискретной радиальной подаче брусков, когда значение S_p известно.

При разжиме брусков «по давлению», когда величина S_p является неизвестной, для раскрытия статической неопределенности системы (5) составлено дополнительное уравнение, выражающее условие равновесие всех сил Q_k

$$\sum_{k=1}^N Q_k = Q_p, \quad (6)$$

где Q_p – суммарное усилие прижима брусков к обрабатываемой поверхности.

Если пренебречь деформацией детали $W(x)$ под действием усилия прижима брусков, что справедливо для толстостенных цилиндров, то система уравнений (5) и (6) примет следующий вид относительно $N + 1$ неизвестных Q_k и S_p :

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^N \Pi_{kl} Q_l = S_p, & k = 1, \dots, N, \\ \sum_{k=1}^N Q_k = Q_p. \end{cases} \quad (7)$$

Поскольку деформацию контактного слоя в различных ее точках взаимодействия с зернами по данным работы [6] можно рассматривать как независимую, то коэффициенты $\Pi_{kl} = 0$ для всех $k \neq l$.

Из исследований [6] также известно, что при взаимодействии алмазного инструмента с обрабатываемой поверхностью инструмент деформирует не только микронеровности, но и также макронеровности этой поверхности. Поэтому для обеспечения непрерывности контакта с деталью по всей поверхности брусков при их разжиме будем считать, что исходное отклонение формы отверстия уменьшает его диаметр. Такая модель взаимодействия брусков с обрабатываемой поверхностью описывается следующей системой уравнений

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^N \Pi_{kl} Q_l = S_p + \delta_k^{ij}, & k = 1, \dots, N; \\ \sum_{k=1}^N Q_k = Q_p, \end{cases} \quad (8)$$

где δ_k^{ij} – отклонение формы обрабатываемой поверхности в пределах ij -го участка поверхности в момент взаимодействия с k -м зерном. Решение системы (8) дает значения радиальных сил Q_k ($k = 1, 2, \dots, N$) для всех участков поверхности с учетом их отклонения формы.

При движении зерна по обрабатываемой поверхности вследствие непостоянства величины отклонения формы на ее различных участках, усилие Q_k также непрерывно изменяется. Для упрощения модели процесс хонингования представляется дискретным по времени. За величину дискреты принимается максимальное время прохождения зерна через один участок в окружном или осевом направлении. В течение этой временной дискреты усилие Q_k считается неизменным.

В процессе хонингования циклически происходит реверс осевого движения брусков с их задержкой в крайних точках (рис. 1, а). Поэтому с той же периодичностью меняется очередность движения зерен по обрабатываемой поверхности. Для учета этого фактора в имитационной модели предусмотрено определение порядка

прохождения зернами по поверхности при каждом изменении направления движения брусков.

Адекватность разработанной имитационной модели проверялась путем сравнения результатов расчетов, выполненных в среде математического моделирования MATLAB, с данными экспериментов, полученных в работе [4], при одинаковых исходных данных: обрабатываемое отверстие тонкостенного цилиндра из материала 15ХА имеет диаметр 18 мм и длину 50 мм. Поскольку цилиндр закреплялся упругой цангой специальной конструкции, повышающей его радиальную жесткость, цилиндр при обработке можно считать толстостенным. Исходная некруглость отверстия равна 7 мкм. Длина хонинговальных брусков – 50 мм, их ширина – 6 мм. Количество брусков в хонинговальной головке – 2. Характеристика брусков АСВ 80/63 М1-100%. Номинальное давление брусков на обрабатываемую поверхность – 882 кПа, что соответствует усилию прижима брусков $Q_p = 530$ Н. Частота вращения хонинговальной головки – 560 мин⁻¹ (или 32 м/мин), осевая скорость – 8 м/мин. Расчетная величина податливости контактного слоя по методике [6] составляет 0,000095 мм/Н. Величины коэффициентов C_z^k были приняты априорно равными $C_z = 0,0000000375$ мм/(Н·мм). Определение коэффициента C_z может производиться экспериментально применительно к реальному технологическому процессу хонингования с учетом снятого припуска. Для сопоставимости размеров дискретных участков с шириной брусков, как было указано выше, дискретность обрабатываемой поверхности принята 10×12, что соответствует размерам участка 5×5 мм. Время обработки при расчетах составляет 90 с. Требования к результатам обработки: некруглость не более 1 мкм, снятый припуск на сторону – 0,01 мм.

В процессе расчетов контролировалась величина овальности, которая определялась как разность по абсолютной величине сумм отклонений формы поверхности на диаметрально расположенных участках в двух взаимно перпендикулярных направлениях

$$\Delta \delta_j = \left| (\delta_{ij} + \delta_{(i+n/2)j}) - (\delta_{(i+n/4)j} + \delta_{(i+n/4+n/2)j}) \right|,$$

здесь δ_{ij} – отклонение формы обрабатываемой поверхности на ij -м участке поверхности ($i = 1, 2, \dots, n/4 - 1; j = 1, 2, \dots, m$). Для оценки овальности отверстия выбиралось ее максимальное значение из всех $(n/4 - 1) \times m$ рассчитанных.

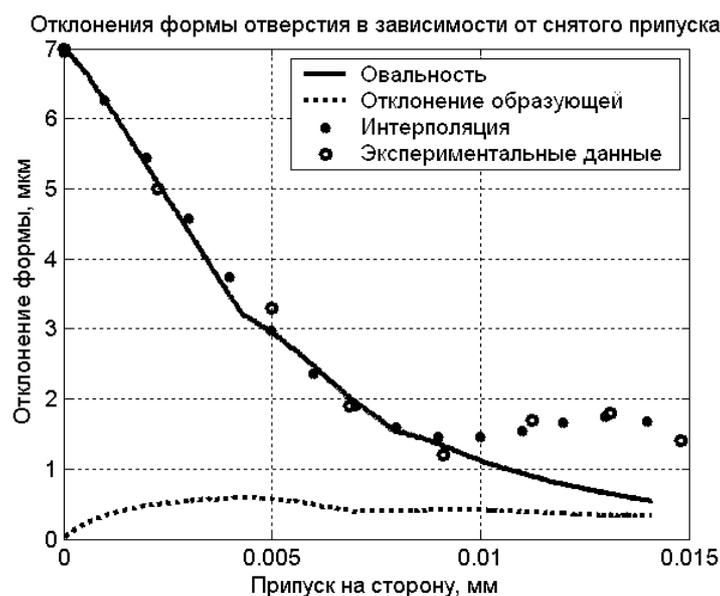


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных

На рис. 2 приведены кривые исправляющей способности процесса хонингования, построенные по данным расчетов и экспериментов. Сравнение этих кривых показывает, что они имеют хорошую сходимость до достижения величины снятого припуска 0,008 мм и некруглости свыше 1,2 мкм.

Однако дальнейшее снятие припуска по данным расчетов и экспериментов приводит к различным результатам: расчеты показывают, что некруглость отверстия продолжает уменьшаться, в то время как экспериментальные данные свидетельствуют о стабилизации некруглости или даже некотором ее увеличении. Для раскрытия выявленного расхождения были проведены дополнительные исследования имитационной модели.

Анализ влияния априорно задаваемого коэффициента C_z (рис. 3) показал, что варьирование его величины (уменьшение в 2 раза, а также увеличение соответственно в 2 раза и 5 раз) не вызывает существенного изменения исправляющей способности хонингования (рис. 3, а), а увеличение этого коэффициента приводит только к пропорциональному росту съема припуска (рис. 3, б).

При изучении влияния дискретности обрабатываемой поверхности на результаты хонингования (рис. 4) установлено, что увеличение

дискретности приводит к большему расхождению расчетных и экспериментальной кривых исправляющей способности (рис. 4, а) при той же производительности хонингования (рис. 4, б). Однако при этом расчетные кривые исправляющей способности не имеют изломов, что может свидетельствовать о более точном моделировании изучаемого процесса.

Но, с другой стороны, из данных на рис. 4 следует, что для большей дискретности 50×60 получены такие же результаты, что и для меньшей дискретности 25×30 , поэтому дальнейшее увеличение дискретности поверхности является бесперспективным для уточнения модели.

Имеющееся расхождение расчетных и экспериментальных данных потребовало уточнения модели хонингования. Известно, что на процесс формообразования отверстия при хонинговании существенное влияние оказывает износ брусков [5] и радиальное биение их режущей поверхности, которое является следствием несоосности обрабатываемого отверстия и режущей поверхности брусков [2, 3]. В частности, радиальное биение брусков имеет место при обработке отверстий однобрусковой головкой (рис. 5) или после закрепления новых брусков на хонинговальной головке даже после их правки.

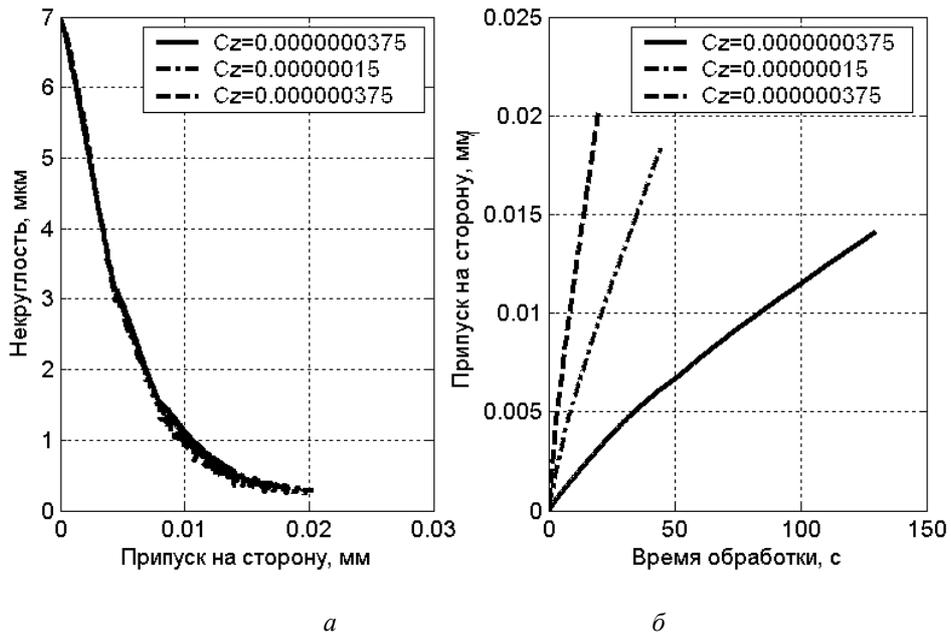


Рис. 3. Влияние коэффициента C_z :
a – на исправляющую способность; *б* – съем припуска во времени

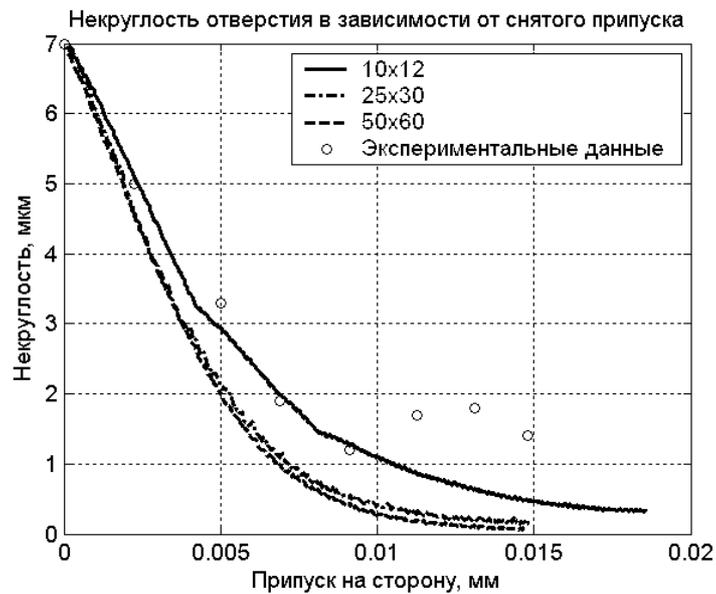


Рис. 4. Влияние дискретности поверхности на исправляющую способность хонингования

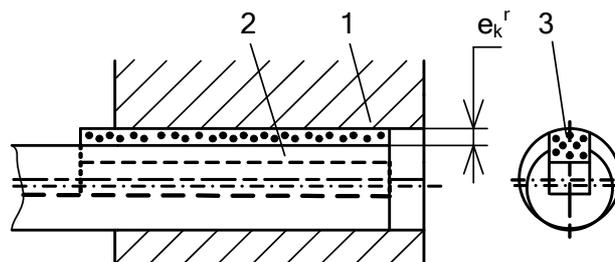


Рис. 5. Расчетная схема: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – корпус головки;
 3 – брусок; e_k^r – радиальное биение k -го зерна

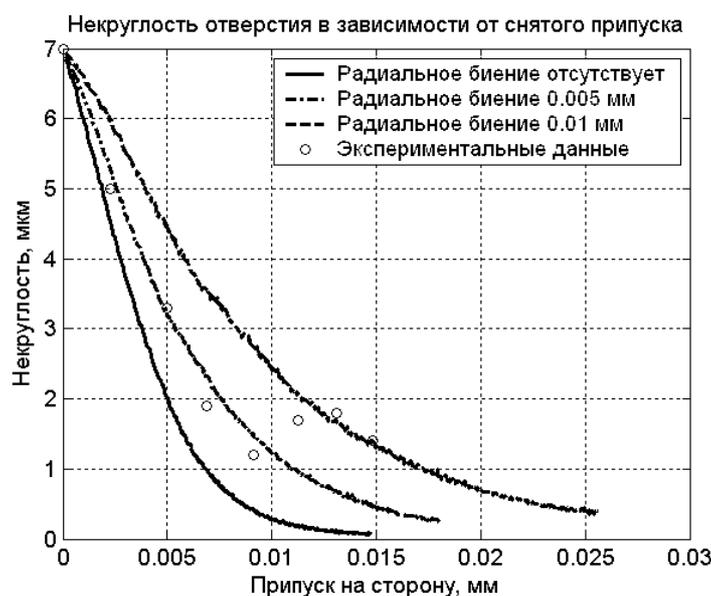


Рис. 6. Влияние радиального биения брусков на исправляющую способность

Поскольку радиальное биение брусков увеличивает деформацию контактного слоя, а износ ее уменьшает, то система уравнений для расчета сил Q_k (8) преобразуется к следующему виду

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^N \Pi_{kl} Q_l = S_p + \delta_k^{ij} + e_k^r - iz_k, & k = 1, \dots, N; \\ \sum_{k=1}^N Q_k = Q_p, \end{cases} \quad (9)$$

здесь e_k^r — радиальное биение k -го зерна; iz_k — радиальный износ k -го зерна.

Изучение влияния радиального биения брусков на исправляющую способность процесса хонингования показало (рис. 6), что наличие биения существенно ухудшает исправляющую способность хонингования: для уменьшения некруглости на одну и ту же величину при большем биении брусков требуется съём большего припуска. Это можно объяснить увеличением сема припуска в направлении радиального биения брусков по причине роста усилия контактного взаимодействия выступающих брусков с обрабатываемой поверхностью в этом направлении отверстия. При этом из рис. 6 также следует, что радиальное биение брусков не ограничивает исправляющую способность процесса хонингования.

При изучении влияния износа брусков величина этого износа на каждом ij -м участке рассчитывается пропорционально длине dS_{ij} пройденного им пути и величине радиального усилия резания Q_k в пределах этого участка. По аналогии с коэффициентом пропорциональности C_z интенсивность износа задается коэффициентом пропорциональности I_z , представляющим собой величину износа одного зерна на единичном пути резания при действии на него радиальной силы $Q_k = 1$. Исследование влияния износа проводилось для двух значений коэффициента I_z . Первое значение коэффициента I_z было принято в 100 раз меньше, чем коэффициент C_z ($I_z = 5 \cdot 10^{-9}$). Второе значение равнялось величине коэффициента $C_z = 5 \cdot 10^{-7}$. Результаты расчетов исправляющей способности хонингования для этих значений коэффициента I_z с учетом износа брусков приведены на рис. 7.

Из приведенных на рис. 7 данных следует, что при заданных условиях обработки интенсивность износа алмазных брусков практически не влияет на исправляющую способность процесса хонингования. Это факт можно объяснить тем, что при разжиге брусков «по давлению» в процессе их возвратно-поступательного движения вследствие износа происходит постоянное нивелирование режущей поверхности брусков.

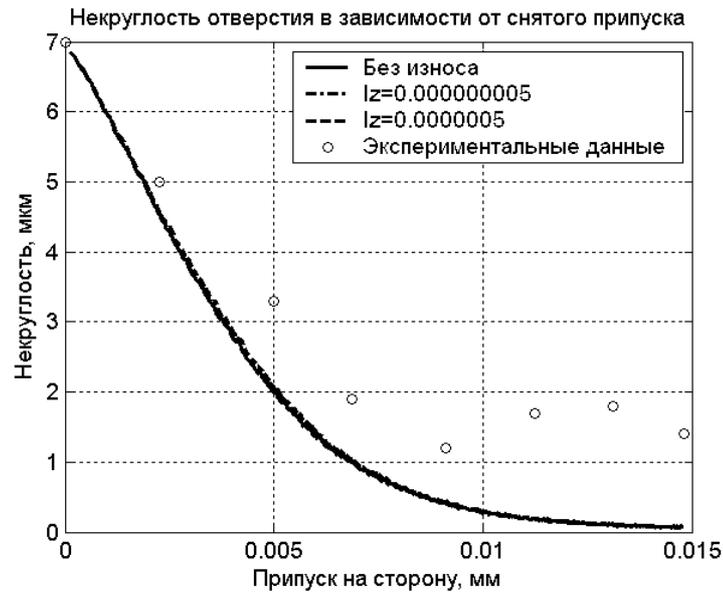


Рис. 7. Исправляющая способность процесса хонингования при различных значениях коэффициента I_z

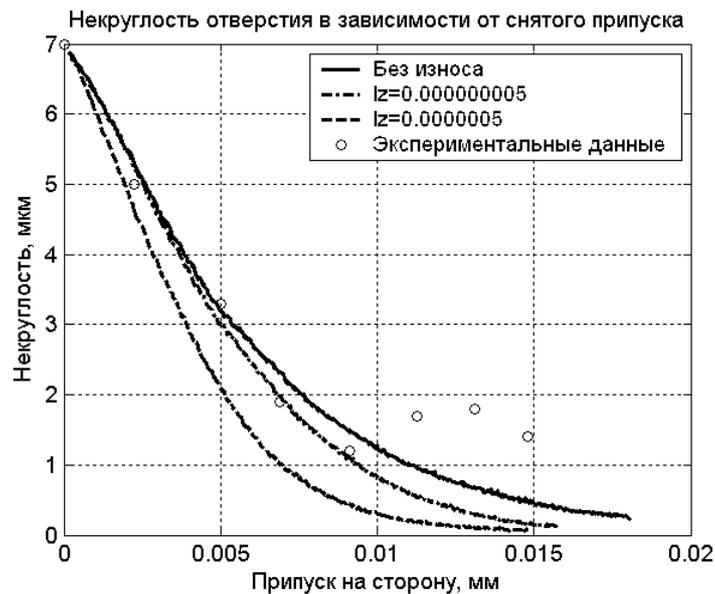


Рис. 8. Исправляющая способность при различной интенсивности износа брусков и их исходном радиальном биении 0,005 мм

Поскольку радиальное биение брусков и их износ оказывают различное влияние на исправляющую способность процесса хонингования, можно предположить, что износ брусков должен приводить к уменьшению радиального биения брусков. Для проверки данного предположения были выполнены расчеты по исправлению некруглости отверстия брусками, имеющими исходное радиальное биение 0,005 мм при различных вариантах интенсивности их износа. Результаты этих расчетов приведены на рис. 8, из которых следует, что при наиболее интенсивном износе брусков происходит пол-

ное устранение радиального биения, а исправление некруглости соответствует процессу хонингования брусками без радиального биения (рис. 6).

Таким образом, ни один из рассмотренных факторов не является причиной расхождения расчетных и экспериментальных данных.

В этой связи были изучены условия проведения натурального эксперимента. Как было указано ранее, обрабатываемый тонкостенный цилиндр закреплялся в приспособлении, повышающим жесткость заготовки за счет обжатия упругой цангой специальной конструкции.

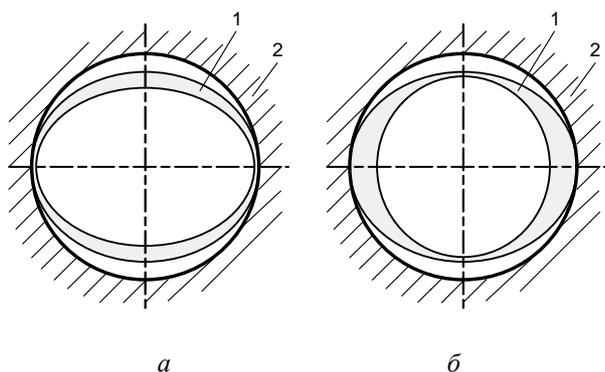


Рис. 9. Влияние отклонения наружной поверхности тонкостенного цилиндра *1* на изменение некруглости обрабатываемого отверстия при зажиме цангой *2*:
a – овалности отверстия уменьшается;
б – овалности отверстия увеличивается

Следовательно, при закреплении тонкостенного цилиндра может иметь место его деформация, которая приводит к изменению исходной некруглости отверстия – исходная некруглость может при зажиме уменьшиться или, наоборот, увеличиться. На рис. 9 показаны случаи, когда в результате зажима тонкостенного цилиндра *1* цангой *2*, не имеющей отклонений формы зажимной поверхности, произойдет уменьшение исходной некруглости отверстия (рис. 9, *a*), так как овалность отверстия больше, чем наружной поверхности и они однонаправлены. Во втором случае исходная некруглость отверстия увеличится (рис. 9, *б*), поскольку овалности

отверстия и наружной поверхности разнонаправлены.

В процессе хонингования происходит исправление отклонения формы обрабатываемого отверстия, однако после снятия зажимного усилия отверстие восстанавливает свою форму, но с учетом произведенного исправления отклонения.

Для проверки этого предположения выполнены расчеты для двух вариантов закрепления цилиндра в цанге – соответственно с увеличением овалности и с уменьшением овалности отверстия на 1 мкм в результате деформации цилиндра при зажиме. При расчетах принималось во внимание радиальное биение брусков, а их износ из-за его незначительности применительно к обработке одной детали не учитывался. Результаты расчетов приведены на рис. 10.

Из рис. 10, *a* следует, что увеличение овалности отверстия при закреплении тонкостенного цилиндра приводит к получению обратной некруглости обработанного отверстия. Однако расчетная и экспериментальная кривые исправляющей способности имеют существенное расхождение.

При другом варианте закрепления тонкостенного цилиндра, приводящего к уменьшению овалности отверстия (рис. 10, *б*), наблюдается практически полностью совпадение расчетных и экспериментальных данных. Имеющиеся расхождения по величине отклонения формы отверстия в конце его обработки могут быть связаны с точностью измерений.

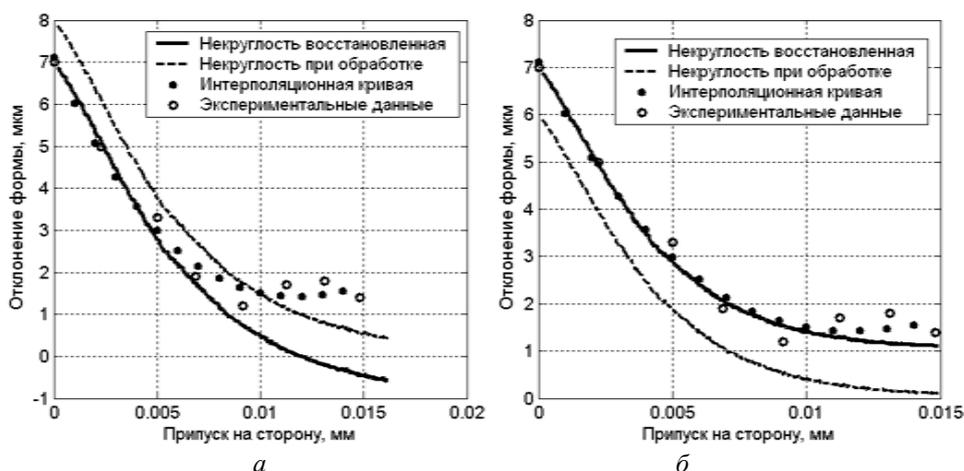


Рис. 10. Влияние деформации детали при закреплении на точность обработки отверстия:
a – при увеличении овалности (радиальное биение брусков – 0,005 мм); *б* – при уменьшении овалности (радиальное биение брусков – 0,0025 мм)

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что разработанная имитационная модель процесса алмазного хонингования адекватно описывает исправление исходной некруглости обрабатываемого отверстия.

Однако в работе [4] отсутствуют данные о съеме припуска во времени для рассматриваемого эксперимента, что не позволяет судить о полной адекватности разработанной имитационной модели. В этой связи полученные в результате проведенного численного эксперимента зависимости съема припуска во времени для оценки функциональной адекватности были сопоставлены с приведенной в работе [8] экспериментальной кривой динамики съема припуска. В результате этого сравнения выявлено, что между расчетными и экспериментальной зависимостями съема припуска имеется качественная сходимость.

Таким образом, разработанная имитационная модель процесса хонингования, открывает новые возможности по изучению этого процесса [9, 10], а также разрабатывать новые способы хонингования. На основе имитационного моделирования были разработаны новые способы хонингования, которые защищены патентами РФ №№2344921, 2344922, 2348500 и 2388586, заключающиеся в управлении окружной скоростью брусков при их движении вдоль оси обрабатываемого отверстия, что обеспечивает повышение точности обработки как глухих, так и сквозных отверстий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фрагин И. Е.** Научные основы повышения точности и производительности хонингования: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. М., 1975. 56 с.
2. **Ризванов Ф. Ф.** Исследование условий и разработка средств повышения точности хонингования отверстий на основе анализа геометрических по-

грешностей и податливости системы СПИД: дисс. ... канд. техн. наук. Куйбышев, 1977. 148 с.

3. **Романчук В. А.** Исследование методов и разработка средств автоматического обеспечения точности размеров отверстий при алмазном хонинговании: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 1977. 144 с.

4. **Акмаев О. К.** Исследование и разработка перспективной технологии алмазного хонингования прецизионных отверстий деталей гидравлических систем летательных аппаратов: дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 1983. 160 с.

5. **Кудояров Р. Г.** Точность деталей при алмазном хонинговании. М.: Изд-во МАИ, 2002. 170 с.

6. **Чеповецкий И. Х.** Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке. Киев: Наукова думка, 1978. 228 с.

7. **Соболь И. М., Статников Р. Б.** Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 104 с.

8. Вопросы расчета и конструирования оснастки, обеспечивающей повышение точности при хонинговании: тр. УАИ. Вып. 44. Уфа, 1973. 159 с.

9. **Огородов В. А.** Идентификация процесса хонингования // Станки и инструмент. 2007. №10. С. 37–40.

10. **Огородов В. А.** Повышение эффективности алмазного хонингования глухих отверстий // Станки и инструмент. 2007. № 11. С. 28–31.

ОБ АВТОРЕ



Огородов Владимир Алексеевич, доц. каф. автоматиз. технол. процессов. Дипл. инж.-мех. по технолог. машиностр., металлореж. станкам и инстр. (УАИ, 1975). Канд. техн. наук по технол. произв. ЛА (КАИ, 1985). Иссл. в обл. хонингования.