

УДК 621.9

DOI: 10.30987/article_5d6518cda7ab21.36783769

В.А. Спирин, к.т.н., **В.Ф. Макаров**, д.т.н., **О.А. Халтурин**, старший преподаватель
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 15)
E-mail: makarovv@pstu.ru; oleg-x@pstu.ru

Оценка технологических возможностей процесса глобоидного зубохонингования

Предложена методика оценки технологических возможностей глобоидного зубохонингования эвольвентных профилей. Проведена оценка точности процесса по выбранным параметрам измерений и статистическая обработка результатов измерений по параметрам: изменение длины общей нормали, радиальное биение. Проведена экспериментальная проверка по определению влияния условий обработки на шероховатость обработанных зубчатых поверхностей.

Ключевые слова: точность профиля; параметры точности; шероховатость; условия обработки.

V.A. Spirin, Can. Sc. Tech., **V.F. Makarov**, Dr. Sc. Tech., **O.A. Khalturin**, Senior lecturer
(Perm National Research Polytechnic University, 15, Academician Korolyov Str., Perm, 614013)

Technological potentialities assessment of globoidal honing process

A procedure for the assessment of technological potentialities of involute profile globoidal gear honing is offered. The assessment of process accuracy on measurement parameters chosen and statistical processing of the measurement results on parameters: changes in a general normal length, a radial runout is carried out. An experimental verification on the definition of processing conditions impact upon roughness of gear surfaces processed is carried out.

Keywords: profile accuracy; accuracy parameters; roughness; processing conditions.

Введение

Кинематика исследуемого процесса глобоидного зубохонингования отличается от кинематики известных способов зубохонингования. Предложенный способ осуществляется как при кинематическом, так и при свободном обкате инструмента и детали при радиальной схеме нагружения. При этом скорости резания и направление вращения инструмента совпадают, а само резание осуществляется при малых частотах вращения. Поэтому нельзя перенести результаты известных работ по исследованию технологических характеристик зубохонингования на новый процесс [1 – 6].

Кроме того, до настоящего времени практически отсутствуют работы посвящённые исследованию технологических характеристик зубохонингования червячными хонами, тем более глобоидными червячными хонами на упругой связке [7, 8].

Из сказанного очевидна необходимость исследования закономерность изменения технологических параметров процесса глобоидного зубохонингования, а также разработки математических зависимостей позволяющих

прогнозировать эти параметры [9, 10].

Методика исследования

Качество поверхностного слоя, формирующегося в процессе глобоидного зубохонингования, оценивалось по шероховатости рабочих поверхностей. Низкие температурные характеристики процесса зубохонингования, обусловленные соответствующими режимами обработки, делают не целесообразным исследование упрочняющих и остаточных напряжений в поверхностном слое рабочих поверхностей зубьев.

Процесс глобоидного зубохонингования характеризуется образованием сетки на рабочих поверхностях зубьев. Поэтому шероховатость зубчатых деталей должна оцениваться в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Однако трудности измерения шероховатости зубчатых деталей, особенно сложнопрофильных, в поперечном направлении заставляют воспользоваться рекомендациями о контроле шероховатости рабочих поверхностей зубчатых колёс в направлении удобном для измерения, и ограничиться измерениями ше-

роховатости в продольном (вдоль образующей профиля) направлении. Оценки шероховатости проводились по параметру Ra . Сравнительные измерения шероховатости в продольном и поперечном направлении показали, что шероховатость в поперечном направлении в 1,5 раза больше, чем в продольном. Измерение шероховатости проводилось на профилометре-профилографе модели 201.

Помимо оценки шероховатости рабочих поверхностей зубьев осуществлялся контроль точности процесса глобоидного зубохонингования. Для этого до и после зубохонингования измерялись следующие параметры зубчатого венца:

- длина общей нормали W – с помощью нормалеметра НЦ-1;
- погрешность профиля зуба f_{fr} – на эвольвентометре КЭУ СМА;
- радиальное биение F_{rr} – на биенетре Б10М.

Для проведения экспериментов по определению изменения шероховатости при изменении режимов обработки использовались эвольвентные зубчатые шестерни со шлифованным венцом и исходной шероховатостью поверхности $Ra_{\text{прод}} = 0,32$ мкм с характеристиками: $m = 5,5$ мм; $z = 17$; $\alpha_d = 20^\circ$.

Глобоидное зубохонингование производилось инструментами на упругой каучукосодержащей связке на станке 5Д32 при кинематическом обкатывании с использованием СОЖ состава: керосин + 15 % масло «Индустриальное-20».

Технологические характеристики глобоидного зубохонингования оценивались следующими параметрами: съём в направлении дли-

ны общей нормали и удельный расход абразива.

Исследование качества поверхности при глобоидном зубохонинговании и характеристик процесса производилось в зависимости от режимов обработки с применением математического планирования эксперимента и последующей статистической обработки результатов эксперимента. В качестве переменных факторов были выбраны следующие: материалы образцов: сталь 45 (200...220 НВ) и сталь 12ХН3А цементированная (58...62 HRC); скорость зубохонингования v в пределах 0,5...1,5 м/с; величина радиального смещения t в пределах 0,3...0,7 мм; осевая подача (вдоль оси детали) s в пределах 1,0...3,0 мм/об.

При выполнении плана эксперимента исследовались изменения шероховатости, съёма материала и удельного расхода абразива при изменении режимов обработки в указанных пределах.

Оценка точности обработки

Результаты контроля точности процесса глобоидного зубохонингования подвергались статистической обработке [10, 12].

Сравнение распределений измерений длины общей нормали W до и после зубохонингования 51-го образца при различных параметрах эксперимента показали, что процесс зубообработки влияет на её абсолютную величину (табл. 1), т.к. величина расчётного значения критерия Стьюдента $t_{\text{расч}}$ больше табличного $t_{\text{табл}}^{0,95}$.

1. Статистический анализ точности длины общей нормали при глобоидном зубохонинговании

\bar{x}_1 , мм	S_1^2	\bar{x}_2 , мм	S_2^2	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}^{0,95}$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}^{0,95}$
41,758	$2,77 \cdot 10^{-6}$	41,706	$4,01 \cdot 10^{-6}$	23,77	2,00	1,44	1,6

Примечания: \bar{x}_1 и \bar{x}_2 – средние значения длины общей нормали W до и после зубохонингования;
 S_1^2 и S_2^2 – дисперсии значений длины общей нормали W до и после зубохонингования.

Изменение длины общей нормали объясняется значительными съёмами материала с рабочих поверхностей зубьев. Уменьшение длины общей нормали не приводит к уменьшению рассеяния её размеров (рис. 1), о чём также свидетельствует несущественное различие $F_{\text{расч}}$ и $F_{\text{табл}}^{0,95}$. Следовательно, точность зубчатых венцов по параметру W после зубохонингования остаётся такой же, как после

предшествующей обработки шлифованием.

Исследование радиального биения зубчатого венца F_{rr} позволило установить неизменность этого параметра после глобоидного зубохонингования.

Сравнение распределений измерений погрешностей профиля зуба f_{fr} производилось после шлифования и последующего зубохонингования при расчётных параметрах установки инструмента. Глобоидное зубохонинго-

вание при расчётных установках инструмента практически не влияет на профиль зубчатых деталей, т.к. средние значения величин погрешностей профиля остаются неизменными (табл. 2, рис. 2).

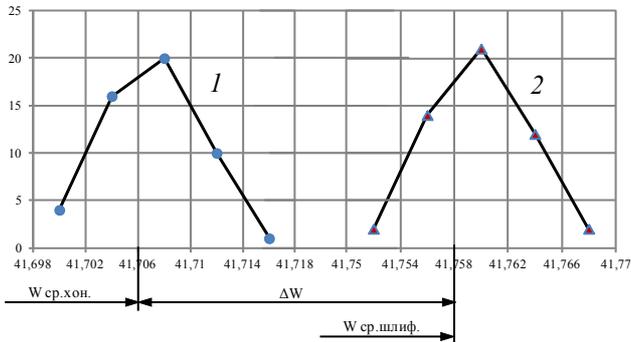


Рис. 1. Рассеяние размеров длины общей нормали деталей из стали 12ХН3А при обработке инструментом КЗ 200/160 Р18 50%:

1 – после шлифования, 2 – после зубохонингования

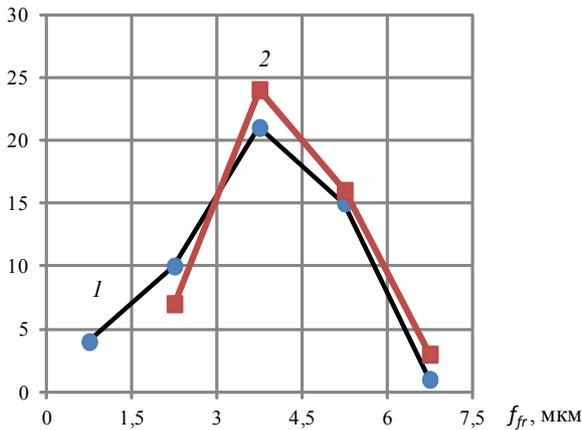


Рис. 2. Рассеяние отклонений профиля зубчатых колёс из стали 12ХН3А при обработке инструментом КЗ 200/165 Р18 50%:

1 – после шлифования, 2 – после зубохонингования

2. Статистический анализ точности профиля зуба при глобидном зубохонинговании

\bar{x}_1 , мм	S_1^2	\bar{x}_2 , мм	S_2^2	$t_{расч}$	$t_{табл}^{0,95}$	$F_{расч}$	$F_{табл}^{0,95}$
4,2	2,10	4,4	3,65	1,87	2,00	1,37	1,6

Примечания: \bar{x}_1 и \bar{x}_2 – средние значения погрешности профиля зуба $f_{пр}$ до и после зубохонингования; S_1^2 и S_2^2 – дисперсии значений погрешности профиля зуба $f_{пр}$ до и после зубохонингования.

Неизменность точностных параметров до и после зубохонингования позволяет сделать вывод о том, что процесс глобидного зубохонингования сохраняет параметры точности зубчатого венца, полученные на предыдущей операции шлифования.

Значительные съёмы, сопровождающие процесс глобидного абразивного зубохонингования, подтверждают гипотезу о возможности управления процессом формообразования рабочего профиля с помощью параметров установки глобидного инструмента.

Зависимость шероховатости рабочих поверхностей эвольвенты от условий обработки

Многочисленные измерения шероховатости вдоль эвольвентных профилей зубьев показали, что шероховатость практически одинакова во всех точках профиля, что объясняется стабильностью условий резания в зоне обработки и кратностью нагружения.

Исследование позволили установить, что материал детали, вид химико-термической обработки, материал и зернистость абразива оказывают существенное влияние на величину и характер изменения шероховатости.

Диаграммы, представленные на рис. 1, позволяют провести анализ влияния свойств обрабатываемого материала, характеристик и материала инструмента на шероховатость рабочих поверхностей зубчатых колёс при неизменных режимах обработки.

Свойства и химико-термическое состояние материалов оказывают значительное влияние на шероховатость поверхности при равных условиях обработки. Шероховатость стали 45 (200...220 НВ) достигает Ra 0,4 мкм. При хонинговании зубчатых деталей из стали 12ХН3А цементированной (59...62 HRC) Ra 0,1 мкм.

Материал и величина зёрен влияют на шероховатость традиционным образом: с увеличением размеров зёрен шероховатость увеличивается за счёт снижения количества зёрен, приходящихся на единицу обрабатываемой поверхности. Съёмы при работе инструментом АС2 80/63 Р18 50 % очень незначительные (в пределах шероховатости), при этом шероховатость поверхности может снижаться значительно и достигает значений Ra 0,07 мкм.

В результате реализации некомпозиционного плана второго порядка с целью получения интерполяционных моделей, описывающих зависимость шероховатости рабочих поверхностей от режимов обработки (скорости резания v , рабочей подачи s и радиального смещения t), а также на основании результатов дисперсионного и регрессионного анализа установлено, что режимы обработки, изменяемые в заданном диапазоне, не влияют на шероховатость обработанных поверхностей.

Анализ результатов исследований показал, что имеет место некоторое колебание шероховатости в пределах дисперсии, однако вели-

чина этих изменений в зависимости от режимов обработки не даёт основания для построения интерполяционной модели. Такое поведение шероховатости объясняется тем, что упругая каучукодержащая связка при радиальном нагружении позволяет получать вместо линии контакта площадку контакта, которая делает шероховатость нечувствительной к изменению продольной подачи.

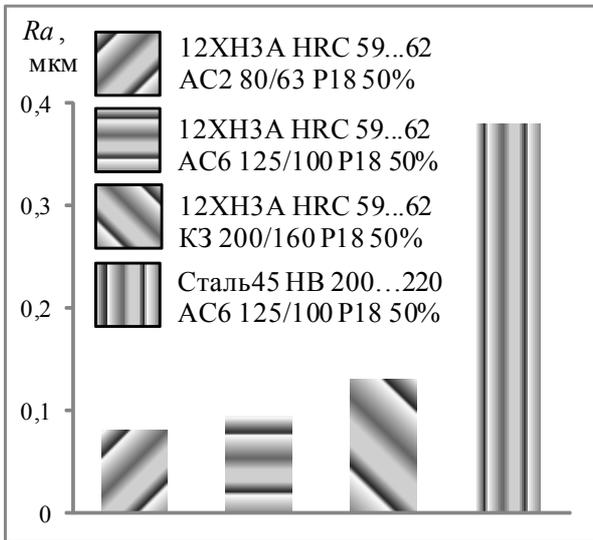


Рис. 3. Зависимость шероховатости от обрабатываемого материала и характеристик абразивного слоя.

Режимы обработки:

$v = 1 \text{ м/с}; t = 0,5 \text{ мм}; s = 2 \text{ мм/об}$

Выводы

При глобидном зубохонинговании даже при значительных съемах точность зубчатых колёс остаётся неизменной.

Шероховатость поверхности при глобидном зубохонинговании абразивом на органических каучукодержащих связках зависит от свойств и состояния обрабатываемого материала, марки и зернистости абразива. При этом режимы резания в исследуемом диапазоне на шероховатость поверхности не влияют.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников, А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 279.
2. Сторчак, М.Г., Севастьяненко, Г.Н. Возможности повышения износостойкости зубчатых колес алмазным зубохонингованием // Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем: сб. науч. тр. – Москва, 1986. – С. 84-86.
3. Сторчак, М.Г., Севастьяненко, Г.Н. Повышение эффективности отделочной обработки зубчатых колес многозубыми инструментами // Теория реальных передач зацепления: сб. науч. тр. – Курган, 1988. – С. 86-87.
4. Калашников, С.Н., Калашников, А.С. Зубчатые колеса и их изготовление. – М.: Машиностроение, 1983. – 264 с.

5. Фрадкин, Е.И. Погрешности зубообработки, вызванные неточной настройкой гитары деления зубообрабатывающих станков // Вестник машиностроения. – 1998. – №6. – С. 264.

6. Грибанов, В.М. Аналитическая теория реальных зацеплений и ее применение к исследованию зубчатых передач Новикова // Снижение металлоемкости зубчатых передач и редукторов: Тез. докл. научн.-техн. конф. – Свердловск, – 1984. – С. 33.

7. Спири, В.А., Макаров, В.Ф., Халтурин, О.А. Глобидное зубохонингование эвольвентных профилей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №5(95). – С.19-23.

8. Спири, В.А., Макаров, В.Ф., Халтурин, О.А. Износ абразивного слоя при глобидном зубохонинговании // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2019. – №6(96). – С. 45-48.

9. Булгаков, Э.Б. Теория зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1995. – 320 с.

10. Цепков, А.В., Спири, В.А., Серебренник, Ю.Б. Финишная обработка роторов винтовых забойных двигателей // Тез. докл. зональной НТК «Пути повышения производительности и качества механообработки деталей на машиностроительных предприятиях Урала». – Свердловск, – 1984. – С. 74-75.

11. Красовский, Г.И., Филаретов, Г.Ф. Планирование эксперимента. – Минск: Изд-во БГУ, 1982. – С. 302.

12. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов: пер. с англ. / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука, 1986. – 230 с.

REFERENCES

1. Reznikov, A.N. *Thermo-physics of Material Machining Processes*. – M.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 279.
2. Storchak, M.G., Sevastiyenko, G.N. Possibilities for wear-resistance increase of gear wheels by diamond tooth-honing // *Theory and Practice of Creation, Testing and Operation of Tribo-technical Systems: Proceedings*. – Moscow, 1986. – pp. 84-86.
3. Storchak, M.G., Sevastiyenko, G.N. Finishing effectiveness increase of gear wheels by multi-tooth tools // *Theory of Real Gearing: Proceedings*. – Kurgan, 1988. – pp. 86-87.
4. Kalashnikov, S.N., Kalashnikov, A.S. *Gear Wheels and Their Manufacturing*. – M.: Mechanical Engineering, 1983. – pp. 264.
5. Fradkin, E.I. Errors in tooth machining caused by inaccurate index change gear train of tooth-cutting machines // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1998. – No.6. – pp. 264.
6. Gribov, V.M. Analytical theory of real gearings and its use in investigations of Novikov gearing // *Reducer and Gearing Metal Intensity Decrease: Proceedings of the Scientific-Tech. Conf.* – Sverdlovsk, 1984. – pp. 33.
7. Spirin, V.A., Makarov, V.F., Khalturin, O.A. Globoidal tooth-honing of involute profiles // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.5 (95). – pp. 19-23.
8. Spirin, V.A., Makarov, V.F., Khalturin, O.A. Abrasion layer wear at globoidal tooth-honing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2019. – No.6 (96). – pp. 45-48.
9. Bulgakov, E.B. *Theory of Gearing*. – M.: Mechanical Engineering, 1995. – pp. 320.
10. Tsepkov, A.V., Spirin, V.A., Serebrennik, Yu.B. Reducer finishing of screw downhole motors // *Proceedings of Regional STC "Ways to Increase Productivity and Parts Machining Quality Engineering Enterprises of Urals"*. – Sverdlovsk, - 1984. – pp. 74-75.
11. Krasovskiy, G.I. Filaretov, G.F. *Experiment Planning*. – Minsk: BSU Publishers, 1982. – pp. 302.
12. Lowson, Ch. *Numerical Solution of Problems by Least-Square Methods*: transl. from Engl. / Ch. Lowson, R. Henson. – M.: Science, 1986 – pp. 230.

Рецензент д.т.н. Е.Д. Мокроносов