

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ РОБАСТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ Г.ТАГУЧИ ДЛЯ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Е.Э.Фельдштейн, кандидат технических наук, Зеленогурский университет

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) детали играет значительную роль в обеспечении благоприятных условий ее эксплуатации. В формировании свойств поверхностного слоя детали при ее ППД принимают участие две группы факторов. Первая группа – непосредственно режимы ППД, такие, как скорость и подача накатного ролика, усилие и количество проходов при накатывании, условия смазывания ролика и т.п. Другую группу факторов необходимо учитывать в связи с существованием технологической наследственности между чистовыми и черновыми операциями механической обработки. Известно, что основные свойства поверхностного слоя детали – его геометрические характеристики, микротвердость, напряженное состояние, поверхностная энергия и цельность поверхности, химический состав, структура и другие формируются на протяжении всего периода обработки детали. Отдельные свойства и характеристики поверхности в процессе обработки в

значительной степени "наследуются" от предыдущих операций [1]. Взаимодействие пооперационных наклепов, напряжений, структурных превращений обуславливает получение определенного физико-химического состояния поверхностного слоя.

Учитывая значительное количество факторов, влияющих на процесс ППД, поиск его оптимальных условий целесообразно производить с использованием отсеивающих экспериментов [2]. С этой точки зрения интерес представляет методика робастного проектирования процессов Г. Тагучи, широко используемая для целей менеджмента качества и включающая специальную технику планирования экспериментов [4]. Идея данной методики заключается в том, в качестве функции отклика рассматривается не сам параметр анализируемого процесса, а его дисперсия. Для этого Г. Тагучи предлагает в качестве отклика специальный параметр, названный им «сигнал–шум». Цель реализации методики заключается в том,

чтобы минимизировать изменчивость выходной величины, вызванную действием факторов шума, максимизируя значение отклика «сигнал/шум».

В данном исследовании ставились задачи оценки возможности использования методики Г. Тагучи для оптимизации условий обработки ППД и анализа влияния этих условий на шероховатость обкатанной поверхности.

В методе Г. Тагучи в ходе реализации исследований и обработки результатов рассматриваются сигнал, шум и управляющие факторы. Факторы шума – факторы, которые находятся вне контроля оператора, управляющие факторы устанавливаются или управляются оператором машины в ходе обработки. В идеальных условиях выходной сигнал (в нашем случае шероховатость поверхности после ППД) будет реагировать только на сигналы оператора и не будет реагировать на случайные изменения в ходе процесса. Следовательно, цель планов Г. Тагучи может рассматриваться как попытка максимизировать отношение „сигнал – шум“:

$$\text{Eta} = -10 \cdot \lg_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \rightarrow \max .$$

Возможность использования метода Г. Тагучи рассматривалась применительно к процессу накатывания роликом наружных цилиндрических поверхностей. Тороидальный ролик диаметром 60 мм с радиусом закругления 20 мм выполнялся из закаленной стали, образцы – ролики диаметром 35 мм – из стали 45 в состоянии поставки. Накатывание осуществлялось на токарном станке с установкой комплекта из 5 роликов на общей оправке. Первоначально выполнялось точение комплекта «на проход», непосредственно

после этого – ППД первых трех роликов. Усилие накатывания обеспечивалось гидравлически (изменение давления масла в гидроцилиндре), т.е. в условиях упругого контакта накатного ролика с обрабатываемыми образцами. В качестве технологических сред использовалось минеральное масло SN-150 (аналог И-30) в состоянии поставки, а также масло, модифицированное присадками MotorLIFE и ACOROX 880. Первая из них содержит соединения хлора и серы, вторая – цинка, фосфора и серы.

Использовался план типа L18, в качестве оптимизируемого фактора принималось значение *Ra* после обкатывания. Измерения выполнялись на профилометре РМ – 02С, по пять измерений на 2-м и 3-м роликах комплекта.

Условия изменения независимых переменных и уровни функции „сигнал – шум” приведены в табл. 1. Функция „сигнал – шум” варьируется в диапазоне (-3,66...12,15). Это достаточно широкий диапазон, что свидетельствует о том, что изменение шероховатости зависит от изменения факторов в установленных планом пределах. Лучший из 18 – случай 5 (отношение „сигнал – шум” наибольшее), худший – случай 6.

Дисперсионный анализ результатов робастного проектирования по Г. Тагучи (табл. 2) позволяет оценить, вызвано ли изменение функции „сигнал – шум” изменением управляющих факторов или же это изменение определено другими, неучтенными факторами (остаточная ошибка). Чем меньше значения *p* в табл. 2 и выше критерий Фишера *F*, тем выше вероятность влияния данного фактора. Легко заметить, что однозначно влияют на шероховатость поверхности после обработки сила ППД и подача резца. Далее в порядке убывания влияния следуют подача ППД, вид

смазки и другие факторы, изменением которых нельзя объяснить изменение функции „сигнал – шум”.

Выступы микронеровностей находятся в различных условиях деформирования. Давление деформирующего элемента передается материалу через контактные поверхности, имеющие разную длину, которая обусловлена различной степенью деформации. Поперечному расширению поверхностного слоя, непосредственно прилежащего к поверхности контакта, препятствует трение, возникающее в контактной зоне и распространяющееся от поверхности в глубь металла. Оно охватывает зону, имеющую клинообразную форму. Пластически деформированные гребешки в этой зоне упрочняются и имеют повышенную твердость. Металл, смежный со сторонами клина, течет в направлении наименьшего сопротивления, т.е. к свободным поверхностям микровыступов и их основаниям. Кроме того, осадка микровыступов вызывает течение металла из глубины и с поверхности, в результате чего микровыступы утолщаются, а впадины заполняются вытесненным металлом. Когда сжатый микровыступ и поднятое основание окажутся на одном уровне, образование новой поверхности заканчивается [3].

Результаты расчетов функции „сигнал – шум”

№ опыта	Факторы								Функция Eta „сигнал – шум”
	Скорость точения*, м/мин	Смазка при ППД	Радиус вершины резца, мм	Подача резца, мм/об	Усилие ППД, Н	Скорость ППД, м/мин*	Подача при ППД, мм/об	Количество проходов ППД	
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	110.0	Sn – 150	0.8	0.1	500.0	61.0	0.083	1	5,45
2	110.0	Sn – 150	1.2	0.3	1250.0	61.0	0.333	2	7,34
3	110.0	Sn – 150	1.6	0.5	2000.0	61.0	0.428	3	7,71
4	110.0	MotorLIFE	0.8	0.1	1250.0	61.0	0.428	3	8,49
5	110.0	MotorLIFE	1.2	0.3	2000.0	61.0	0.083	1	12,15
6	110.0	MotorLIFE	1.6	0.5	500.0	61.0	0.333	2	-3,66
7	110.0	ACOROX 880	0.8	0.3	500.0	61.0	0.333	3	1,40
8	110.0	ACOROX 880	1.2	0.5	1250.0	61.0	0.428	1	1,07
9	110.0	ACOROX 880	1.6	0.1	2000.0	61.0	0.083	2	7,06
10	110.0	Sn – 150	0.8	0.5	2000.0	61.0	0.333	1	7,36
11	110.0	Sn – 150	1.2	0.1	500.0	61.0	0.428	2	6,50
12	110.0	Sn – 150	1.6	0.3	1250.0	61.0	0.083	3	11,81
13	110.0	MotorLIFE	0.8	0.3	2000.0	61.0	0.428	2	5,46
14	110.0	MotorLIFE	1.2	0.5	500.0	61.0	0.083	3	5,56
15	110.0	MotorLIFE	1.6	0.1	1250.0	61.0	0.333	1	9,87
16	110.0	ACOROX 880	0.8	0.5	1250.0	61.0	0.083	2	7,04
17	110.0	ACOROX 880	1.2	0.1	2000.0	61.0	0.333	3	9,36
18	110.0	ACOROX 880	1.6	0.3	500.0	61.0	0.428	1	2,11

* При расчетах изменения скоростей точения и ППД для уровней 1, 2 и 3 принимались соответственно – 0,1 и +0,1 м/мин от номинального значения

Дисперсионный анализ результатов

Факторы	Сумма квадратов SS	Критерий Фишера F	Значение p
Скорость точения, м/мин	18,12	15,62	0,058
Смазка при ППД	27,45	11,83	0,077
Радиус вершины резца, мм	5,33	2,30	0,302
Подача резца, мм/об	41,25	17,78	0,053
Усилие ППД, Н	101,04	43,55	0,022
Скорость ППД, м/мин	19,30	8,32	0,107
Подача ППД, мм/об	34,33	14,80	0,063
Количество проходов ППД	17,85	7,698	0,114

Такой характер формирования стереометрии поверхности можно считать идеальным. Он типичен для сглаживающего режима обработки, когда необходимо получить обработанную поверхность с очень малой шероховатостью. Если высота микронеровностей будет больше, чем осадка микровыступов в процессе их пластического деформирования, на поверхности детали останутся следы предшествующей обработки. Если же высота микронеровностей невелика, деформированию подвергаются не только они непосредственно, но и более глубоко расположенные слои материала и имеет место их упрочнение. Поверхностный же наклеп в ходе ППД выравнивает физико-механические свойства различных участков поверхности, устраняя структурные концентраторы напряжений, выравнивая микротвердость и заменяя растягивающие остаточные напряжения на сжимающие.

На шероховатость поверхности, обрабатываемой ППД, значительное влияние оказывают также форма и однородность микрогребешков, образующихся на предшествующей операции. Наиболее приемлема исходная шероховатость поверхности с равномерно чередующимися выступами, имеющими угол профиля $90^\circ \dots 120^\circ$. Значительно

ухудшают накатанную поверхность вырывы, задиры, следы вибраций и т.д., полученные на предшествующей операции. Отсюда ясно, что следует тщательно выбирать условия предварительной обработки поверхности перед ее ППД.

Условия ППД также оказывают влияние на шероховатость обработанной поверхности. Роль усилия накатывания связана с самим характером обработки методом ППД. Путем его изменения можно в широком диапазоне изменять шероховатость поверхности. Недостаточное усилие накатывания не обеспечивает требуемую деформацию поверхностного слоя, так как сминаются лишь вершины гребешков. С увеличением усилия деформация гребешков увеличивается и шероховатость поверхности уменьшается. Однако чрезмерное увеличение усилия приводит к увеличению шероховатости и даже к разрушению поверхностного слоя (явление перенаклепа). При отделочной обработке оптимальное усилие накатывания должно обеспечить полное сглаживание микронеровностей исходной поверхности, при этом достигается наименьшая шероховатость.

Подача является одним из главных элементов режима обработки, оказывающим значительное влияние на ше-

роховатость накатанной поверхности. Шероховатость обкатанной роликом поверхности уменьшается с уменьшением подачи до определенного ее значения. Дальнейшее уменьшение подачи приводит к некоторому увеличению микрогребешков. Увеличение шероховатости поверхности при чрезмерно малой подаче объясняется весьма большой кратностью приложения нагрузки на единицу площади пятна контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью, что приводит к усталостным явлениям в поверхностном слое металла (перенаклепу) и, как следствие этого, к шелушению. Особенно чувствительны к перенаклепу чугуны и алюминиевые сплавы. Для каждого конкретного случая обработки ППД существует оптимальная подача, необходимая для обеспечения требуемой шероховатости поверхности и зависящая от усилия накатывания, размеров, формы и количества деформирующих элементов в инструменте.

Скорость накатывания при ППД поверхностей не оказывает существен-

ного влияния на их шероховатость. Поэтому при ее выборе необходимо исходить из производительности, принимая максимальное ее значение с учетом жесткости технологической системы и износа деформирующего инструмента.

Влияние количества проходов на шероховатость накатанной поверхности аналогично влиянию усилия и подачи. При увеличении числа проходов до 3-4 отмечается некоторое уменьшение шероховатости обработанной поверхности. Дальнейшее увеличение числа проходов вызывает увеличение шероховатости по причине перенаклепа обработанной поверхности

Поскольку погрешности, выявленные дисперсионным анализом, невелики, с помощью статистического анализа Г. Тагучи можно спрогнозировать оптимальное сочетание условий обработки и ожидаемое значение функции „сигнал – шум” для этих условий (табл. 3). Предлагаемая комбинация условий обработки обеспечивает значение функции 17,32 вместо максимального для начального плана значения 12,15.

Таблица 3

Оптимальное сочетание условий обработки

Факторы	Уровень
Скорость точения, м/мин	110
Смазка при ППД	Sn - 150
Радиус вершина резца, мм	1,2
Подача резца, мм/об	0,1
Усилие ППД, Н	2000,0
Скорость ППД, м/мин	61
Подача ППД, мм/об	0,083
Количество проходов ППД	3
Ожидаемое значение функции „сигнал – шум”	17,32898

Эксперименты, выполненные при данном сочетании условий ППД, зафиксировали среднее значение параметра шероховатости обработанной поверхности $Ra = 0,235$ мкм против

$Ra = 0,245$ мкм в наилучшем сочетании первой серии опытов.

Нами была также предпринята попытка, используя этот массив данных и результаты методики робастного пере-

проектирования процесса по Г. Тагучи, решить эту же задачу с помощью техники регрессионного анализа. Для регрессионного анализа результатов ППД использовалась линейная модель типа

$$B_0 + B_1x_1 + \dots + B_8x_8 - Eta = 0.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты регрессионного анализа

Факторы	Коэффициент β	Стандартная ошибка β	Коэффициент B	Стандартная ошибка B	Критерий Стьюдента $t(9)$	Значение p
Свободный член	-	-	0,77	0,38	2,03	0,072
Скорость точения, м/мин	-0,27	0,16	-0,17	0,10	-1,65	0,131
Смазка при ППД	0,26	0,16	0,10	0,06	1,58	0,148
Радиус вершина резца, мм	0,06	0,16	0,02	0,06	0,37	0,717
Подача резца, мм/об	0,42	0,16	0,16	0,06	2,57	0,030
Усилие ППД, Н	-0,45	0,16	-0,17	0,06	-2,75	0,022
Скорость ППД, м/мин	-0,34	0,16	-0,13	0,06	-2,09	0,065
Подача ППД, мм/об	0,262	0,16	0,10	0,06	1,58	0,148
Количество проходов ППД	-0,13	0,16	-0,05	0,06	-0,83	0,426

Из анализа табл. 4 следует, что реальное влияние на шероховатость поверхности детали после ППД оказывают только подача резца и усилие деформирования, поскольку только для этих факторов критерий Стьюдента выше допустимого ($t_{\text{таб}} = 2,26$), значение p для данных факторов очень невелико, а уровни относительных вкладов β , наоборот, значительны. Коэффициент множественной корреляции $R = 0,86$, критерий Фишера $F = 3,39$.

(пусть даже не совсем адекватно отражающей поведение функции отклика) достаточно точно отражают степень влияния каждого фактора.

Из дальнейших расчетов (табл. 5) следует, что полученная модель адекватна, поскольку непосредственными регрессионными связями нельзя объяснить только 0,04 общего значения шероховатости. Очевидно, что коэффициенты регрессии линейной модели

Результаты дисперсионного анализа

Эффект	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Среднее значение	Критерий Фишера	Значение p
Регрессия	1,36	8	0,17	3,39	0,043
Остаточная ошибка	0,45	9	0,05		
Итого	1,81				

Выводы

Использование робастного проектирования Г. Тагучи позволяет оценить характер и степень влияния значительного количества качественных и количественных переменных факторов на шероховатость обработанной поверхности после ее обкатки роликом. Наиболее существенное воздействие на шероховатость поверхности в этом случае оказывают сила деформирования и подача резца. Обработка результатов позволила также определить оптимальное сочетание факторов, минимизирующее шероховатость обработанной поверхности и ее рассеяние.

Литература

1. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей. – Мн.: Наука и техника, 1971.
2. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. – Мн.: Вышэйшая школа, 1985.
3. Технология размерно-чистовой и упрочняющей обработки / П.С.Чистосердов, Б.П.Чемисов, Л.М.Кожуро, Л.М. Акулович. – Мн.: Университетское, 1993.
4. Taguchi Methods. Case Studies from the U.S. and Europe. – ASI Press, 1989.