

Моделирование технологической наследственности при формировании показателей качества деталей

МЕЖЕННАЯ К.Г., ЯСЕВ А.Г.

НМетАУ, Днепрпетровск

В данной статье выполнено построение математических моделей и графа технологического наследования показателей качества обработки при осуществлении технологического процесса. С помощью полученных моделей выполнено прогнозирование показателей качества окончательного этапа формирования свойств изделия с учетом предшествующих операций технологического процесса.

В даній статті виконана побудова математичних моделей та графу технологічного наслідвання показників якості обробки при здійсненні технологічного процесу. За допомогою отриманих моделей виконане прогнозування показників якості кінцевого етапу формування параметрів виробу з урахуванням попередніх операцій технологічного процесу.

In this article the construction of mathematical models and chart of technological inheritance of indexes of quality of treatment is executed during realization of technological process. By the got models the prognoses of indexes of quality of the final stage of forming of properties of good is executed taking into account the preceding operations of technological process.

Формирование показателей качества изделия происходит на протяжении всего технологического процесса. Результаты выполнения окончательных операций, например шлифования, зависят от предварительной обработки и качества заготовки. Поэтому моделирование технологической наследственности метода шлифования [1, 2], т.е. исследования всей технологической цепочки изменения качественных параметров детали является актуальным вопросом, требующим изучения.

Целью данного исследования является построение модели технологической наследственности процесса шлифования с учетом всех этапов формирования свойств обрабатываемой детали. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Построение математической модели технологического наследования как систем уравнений последовательного формирования свойств изделия с учетом технологических факторов.
2. Моделирование технологической наследственности в виде развернутого графа.
3. Прогнозирование качества выполнения операции шлифования с учетом выполнения предыдущих операций на основании данных о технологической наследственности.
4. Формулирование выводов о результатах исследования.

Основными параметрами качества обрабатываемых деталей являются точность размеров, шероховатость поверхности и качество поверхностного слоя. Процесс последовательного превращения заготовки в готовую деталь сопровождается постоянным изменением этих показателей на каждой операции технологического процесса. Весь процесс технологического насле-

дования свойств детали можно представить в виде систем уравнений последовательного формирования свойств изделия с учетом технологических факторов. Для построения таких систем были проведены эксперименты, в которых для 3-х выборок, состоящих из 9-ти деталей, в условиях производственного процесса на каждой операции были сделаны замеры показателей качества обработки: суммарной погрешности обработки $\Delta_{\text{сум}}$ (разница между действительным размером обработки и уровнем настройки технологической системы), шероховатости Ra и микротвердости H поверхностного слоя. Для определения суммарной погрешности производилось измерение действительных размеров обработки с помощью микрометра точностью 0,001 мм ГОСТ 166-83. Параметр шероховатости Ra контролировался с помощью профилометра мод. 283. Микротвердость исследована методом вдавливания алмазной пирамиды на приборе ПМТ-5.

При этом режимы резания глубина t , подача S и скорость резания V изменялись по методу экстремального планирования экспериментов в пределах каждой операции.

В качестве объекта исследования была взята поверхность $\varnothing 18g7 \begin{pmatrix} -0.006 \\ -0.018 \end{pmatrix}$ Ra 0,32 мкм вала гидронасоса

ДЦН-80. Материал детали - сталь 38Х2НЮА ГОСТ 2590-71. Маршрут обработки данной поверхности состоит из следующих операций: черновое и чистовое точение; черновое, получистовое и чистовое шлифование. Значения режимов резания при осуществлении эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технологический процесс и режимы резания обработки поверхности $\varnothing 18g7$

№ п/п	Наименование операции	Размер обработки	t_{min} , мм	t_{max} , мм	S_{min} , мм/об	S_{max} , мм/об	V_{zmin} , м/мин	V_{zmax} , м/мин
1	Черновое точение	$\varnothing 21,4_{-0,14}$	1	3	0,4	0,5	100	150
2	Чистовое точение	$\varnothing 20_{-0,14}$	0,63	0,77	0,14	0,35	225	320
3	Черновое шлифование	$\varnothing 18,8_{-0,045}$	0,53	0,66	0,0025	0,075	30	50
4	Чистовое шлифование	$\varnothing 18g7 \begin{pmatrix} -0.006 \\ -0.018 \end{pmatrix}$	0,2	0,245	0,001	0,005	20	40

В результате проведенного эксперимента были получены выборки данных по изменению показателей качества в пределах каждой операции технологического процесса. Используя статистический аппарат программы Excel, выполнен регрессионный анализ и построены полиномиальные зависимости каждого их свойств объекта производства от технологических факторов и от значений этого свойства на предшествующей операции. Данный набор аргументов в моделях обуславливается тем, что технологические параметры (в частности режимы резания) имеют сильное влияние на процессы, сопровождающие выполнение технологических операций и главным образом определяют результаты обработки; а значение показателя качества предшествующей операции является звеном, образующим цепочку технологического наследования. Полиномиальные зависимости являются наиболее универсальными и обладают

достаточной наглядностью, демонстрирующей связь между входными и выходными переменными. Выполнена проверка адекватности полученных математических моделей с использованием F -статистики Фишера, для которого уровень значимости, характеризующий вероятность допущения ошибки первого рода принят $\alpha=0,05$, а мощность критерия (вероятность недопущения ошибки второго рода) составляет $(1-\beta)=0,65$ [3]. Применение F -критерия Фишера обусловлено достаточно выгодным соотношением между уровнем значимости α (положительная тенденция для которого состоит в уменьшении) и мощностью $1-\beta$ (обладающей тенденцией к увеличению). Полнота полученных уравнений оценена с помощью коэффициента детерминации R^2 . Полученные зависимости по каждому из свойств представлены в таблице 2.

Таблица 2. Уравнения изменения параметров качества обработки поверхности $\varnothing 18g7$ в ходе технологического процесса изготовления детали вал ДЦН-80

№ п/п	Показатель качества	Уравнение регрессии	F	R^2
1	Суммарная погрешность обработки	$\Delta_1 = 0,089\Delta_0 - 1,978V_1 + 1513,085S_1 + 12,791t_1$	217,98	0,994
		$\Delta_2 = 0,039\Delta_1 - 0,668V_2 + 966,376S_2 + 111,199t_2$	1128,5	0,998
		$\Delta_3 = 0,044\Delta_2 + 0,029V_3 + 1880,8S_3 + 31,583t_3$	424,31	0,997
		$\Delta_4 = 0,426\Delta_3 + 0,023V_4 + 2216,96S_4 + 50,2563t_4$	44,021	0,972
2	Шероховатость поверхности	$Ra_1 = -0,014Ra_0 - 0,005V_1 + 21,094S_1 - 1,719t_1$	87,95	0,986
		$Ra_2 = 0,0936Ra_1 - 0,002V_2 + 6,756S_2 + 0,586t_2$	1741,1	0,999
		$Ra_3 = 0,114Ra_2 + 0,004V_3 + 77,124S_3 + 1,305t_3$	1788,7	0,999
		$Ra_4 = 0,209Ra_3 - 0,0028V_4 + 55,07S_4 + 0,679t_4$	268,51	0,995
3	Микротвердость поверхностного слоя	$H_1 = 0,415H_0 - 0,845V_1 + 503,977S_1 + 59,131t_1$	471,51	0,997
		$H_2 = 0,143H_1 + 0,339V_2 - 10,308S_2 + 449,762t_2$	1327,7	0,999
		$H_3 = -19,431H_2 + 33,452V_3 - 35223,1S_3 + 14338,31t_3$	605,74	0,997
		$H_4 = 0,377H_3 - 5,406V_4 + 55338,54S_4 + 2264,185t_4$	94,987	0,987

Таблица 3. Коэффициенты парной корреляции между факторами и функциями отклика в уравнениях изменения параметров качества обработки поверхности $\varnothing 18g7$ в ходе технологического процесса изготовления детали вал ДЦН-80

№ п/п	Показатель качества	k_{i-1}	k_t	k_S	k_V
1	$\Delta_{сум1}$	0,501323	0,376646	0,723655	-0,39254
	$\Delta_{сум2}$	0,752944	0,004356	0,994394	-0,09885
	$\Delta_{сум3}$	0,95892	0,011119	0,992223	-0,11568
	$\Delta_{сум4}$	0,742813	0,119562	0,745847	-0,01549
2	Ra_1	-0,14922	-0,92983	0,252894	-0,19982
	Ra_2	0,440962	-0,16969	0,967483	-0,16498
	Ra_3	0,89222	0,159965	0,984798	-0,07814
	Ra_4	0,904515	0,011312	0,95551	-0,23234
4	H_1	0,82281	0,220754	-0,36123	-0,11678
	H_2	0,65186	0,929156	0,067859	0,362409
	H_3	-0,54891	-0,40816	-0,84575	-0,32231
	H_4	-0,20854	0,13601	0,39024	-0,56689

Критическое значение критерия Фишера для уровня значимости $\alpha=0,05$ $F_{кр}(3;23)=3,03$ [3]. Во всех случаях фактическое значение критерия Фишера F больше критического значения $F_{кр}$, что свидетельствует об адекватности полученных математических моделей. Значение коэффициента детерминации R^2 в пределах 0,97-0,99 подтверждает правильность выбора факторов при построении моделей.

Поскольку доказана адекватность применения в рассматриваемом случае линейных полиномиальных моделей, то в качестве инструмента для установления степени влияния факторов на функции отклика можно воспользоваться коэффициентами парной корреляции: k_{i-1} – коэффициент, устанавливающий взаимосвязь между значением показателя качества на данной и предшествующей операции. k_t , k_S , k_V – коэффициенты, устанавливающие взаимосвязь между значением показателя качества и элементами режима резания на данной операции.

Значения коэффициентов парной корреляции представлены в таблице 3.

Проанализировав данные таблицы 3 и критическое значение коэффициента корреляции $k_{таб.т}(v=25)=0,323$ [3], можно сделать вывод о наличии

тесной взаимосвязи между факторами и функциями отклика для каждого из уравнений. Наибольшее влияние оказывает значение показателя качества на предшествующем переходе, и наблюдается усиление влияния по ходу выполнения технологического процесса. Из технологических факторов наиболее сильное влияние на показатели качества оказывает подача, при этом также увеличивается значение коэффициента корреляции по мере приближения к окончательным операциям. Глубина резания и скорость имеют меньшее влияние на формирование показателей качества, и имеет место более сильное их влияние на черновых переходах технологического процесса. Объясняется это тем, что глу-

бина резания и скорость влияют на значение технологических нагрузок, которые имеют наибольшее значение именно на начальных операциях. При этом наблюдается значительное варьирование коэффициентов корреляции по каждому из факторов, что объясняется наличием случайных явлений, сопровождающих каждый этап технологического процесса.

Полезно полученные зависимости параметров качества обработки от элементов режима резания представить графически. Построение поверхностей каждой функции выполнено последовательно в двух плоскостях: (SV) и (tS) . Графическая интерпретация уравнений изменения параметров качества представлена на рис.1.

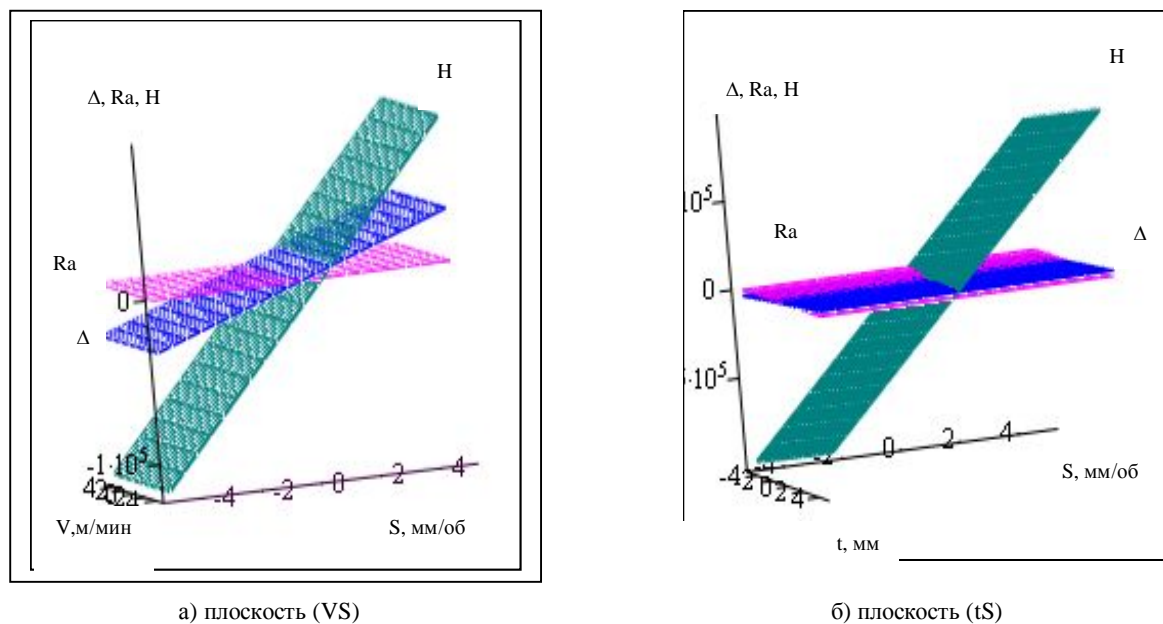


Рис. 1. Графическое представление уравнений изменения параметров качества обработки

Представленные поверхности отображают наличие высокой взаимосвязи между параметром микротвердости поверхностного слоя и элементами режима резания. На формирование суммарной погрешности обработки и шероховатости поверхности режимы резания оказывают более слабое влияние, а в плоскости (tS) наблюдается почти совпадение этих поверхностей. Данная ситуация объясняется слабым влиянием на $\Delta_{\text{сум}}$ и Ra параметра глубины резания t по сравнению с подачей S и скоростью резания V для данного конкретного случая обработки, что подтверждается значениями коэффициентов корреляции.

Вторым способом моделирования технологической наследственности является построение развернутых графов технологического процесса [1]. Построение графа осуществляем на основе уравнений регрессии, полученных обработкой вышеприведенных экспериментальных данных. Эти уравнения иллюстрирует взаимное влияние показателей качества друг на друга. Они демонстрируют, что формирование различных свойств в процессе технологического процесса происходит не параллельно и независимо, а возникают дополнительные связи, количественное выражение которых и дают построенные математические модели. Из уравнений становится очевидным, что суммарная погрешность

обработки $\Delta_{\text{сум}}$ оказывает слабое влияние на значения других параметров. Наоборот, от шероховатости Ra на предшествующей операции в сильной степени зависят значения микротвердости H и погрешности обработки $\Delta_{\text{сум}}$, причем, по мере выполнения технологического процесса эта зависимость возрастает. Микротвердость влияет в основном на значение погрешности обработки, и это влияние снижается на финишных операциях. Уравнения регрессии и проверка их адекватности представлены в таблице 4.

Критическое значение критерия Фишера для уровня значимости $\alpha=0,05$ $F_{кр}(3;23)=3,03$ [3]. $F > F_{кр}$, что свидетельствует об адекватности полученных математических моделей.

На рис. 2 представлен граф технологического наследования, построенный на основе вышеприведенных уравнений взаимного влияния показателей качества обработки. Он является графической интерпретацией уравнений математических моделей из таблицы 4.

Комплекс свойств A заготовки представлен конкретными ее свойствами Δ_0 , Ra_0 , H_0 . Ориентированные ребра показывают наследование каждого из свойств в процессе обработки с определенным значением коэффициента передачи, соответствующим значениям коэффициентов в уравнениях регрессии (таблица 4). Передача представляет

Таблица 4. Уравнения взаимного влияния параметров качества объекта производства в процессе изготовления

№ п/п	Наименование операции	Уравнение регрессии	F	R ²
1	Черновое точение	$\Delta_1 = 0,168\Delta_0 + 17,677Ra_0 + 0,372H_0$	91,01	0,978
		$Ra_1 = -0,003\Delta_0 + 0,124Ra_0 + 0,023H_0$	29,579	0,937
		$H_1 = 0,137\Delta_0 + 6,902Ra_0 + 0,317H_0$	223,169	0,991
2	Чистовое точение	$\Delta_2 = 0,796\Delta_1 + 6,701Ra_1 - 0,464H_1$	68,273	0,971
		$Ra_2 = 0,006\Delta_1 + 0,085Ra_1 - 0,005H_1$	58,707	0,967
		$H_2 = -0,058\Delta_1 + 4,719Ra_1 + 1,255H_1$	140,4	0,986
3	Черновое шлифование	$\Delta_3 = -0,017\Delta_2 + 13,694Ra_2 + 0,047H_2$	539,78	0,996
		$Ra_3 = 0,002\Delta_2 + 0,12Ra_2 + 0,001H_2$	593,59	0,996
		$H_3 = -14,661\Delta_2 + 1801,9Ra_2 + 4,034H_2$	101,779	0,981
4	Чистовое шлифование	$\Delta_4 = -0,943\Delta_3 + 56,49Ra_3 - 0,002H_3$	75,05	0,974
		$Ra_4 = 0,029\Delta_3 + 56,49Ra_3 - 0,0001H_3$	165,121	0,988
		$H_4 = -24,056\Delta_3 + 1110,198Ra_3 + 0,352H_3$	121,989	0,984

Таблица 5. Прогнозирование показателей качества обработки поверхности Ø18g7 детали вал ДЦН-80

№ операции	Наименование операции	Режимы обработки			Параметры качества		
		t, мм	S, мм/об	V, м/мин	$\Delta_{сум}$, мкм	Ra, мкм	H, кгс/мм ²
0	Заготовка	-	-	-	991	16,4	365
1	Черновое точение	3	0,5	100	547	4,4	497
2	Чистовое точение	0,77	0,35	225	322	1,96	490
3	Черновое шлифование	0,6	0,0075	40	42,8	1,13	645
4	Чистовое шлифование	0,245	0,001	20	14,3	0,35	745

собой коэффициент, показывающий количественное изменение свойства. В ходе технологического процесса заготовка превращается в деталь с комплексом свойств F, представленном конкретными свойствами Δ_4, Ra_4, H_4 .

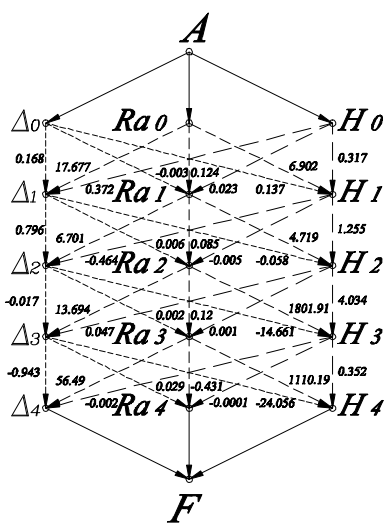


Рис. 2. Развернутый граф технологического наследования при обработке поверхности Ø18g7 детали вал ДЦН-80

Данные о последовательном формировании свойств технологического объекта дают возможность осуществить прогнозирование показателей качества операции шлифования с учетом уровня выполнения всех предшествующих операций технологического процесса. Имея значения показателей качества заготовки и значений технологических параметров обработки на каждой операции, рассчитаем показатели качества ($\Delta_{сум}$ и Ra) для каждой из них. Данные расчетов приведены в таблице 5. В результате получены значения показателей качества, соответствующие требованиям технологического процесса, следовательно, назначенные режимы резания могут быть применены на практике.

Выводы

1. На основе экспериментальных данных выполнено моделирование технологической наследственности при формировании показателей точности обработки (поле рассеивания размеров) и свойств поверхностей (шероховатость и микротвердость) прецизионных деталей. Для этого определены характеристики (коэффициенты парной корреляции и коэффициенты передачи графа технологического наследования) взаимного влияния результатов обработки на разных этапах маршрута, которые имеют высокие и статистически значимые значения при уровне значимости 5% (адекватные по критерию Фишера).

