

УДК 620.179.118

Н. В. ЛИЩЕНКО, канд. техн. наук,
В.П. ЛАРШИН, д-р техн. наук, Одесса, Україна
Ф.С. САБИРОВ, д-р техн. наук, Москва, Росія

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ И ВОЛНИСТОСТИ ФРЕЗЕРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Розглянуто відомі показники якості поверхні та особливості застосування частотного підходу до їх визначення відповідно до нової концепції єдиного виміру різних видів геометричних параметрів якості обробленої поверхні – відхилення форми, хвилястості і шорсткості поверхні. Відзначається, що інструментом поділу нерівностей поверхні в інтервалі їх зміни «від мікро до макро» є фільтрація цифрового сигналу профілограми, отриманого за допомогою комп'ютеризованої апаратури. Наведено покрокова методика та приклади цифрової обробки профілограми при експериментальному дослідженні фрезерованою поверхні.

Рассмотрены известные показатели качества поверхности и особенности применения частотного подхода к их определению в соответствии с новой концепцией единого измерения разных видов геометрических параметров качества обработанной поверхности – отклонения формы, волнистости и шероховатости поверхности. Отмечается, что инструментом разделения неровностей поверхности в интервале их изменения «от микро до макро» является фильтрация цифрового сигнала профилограммы, полученного при помощи компьютеризированной аппаратуры. Приведена пошаговая методика и примеры цифровой обработки профилограммы при экспериментальном исследовании фрезерованной поверхности.

The known parameters of surface quality and frequency approach application features to their definition in accordance with the new concept of unified measurement of different kinds of geometrical parameters of surface quality, such as form deviation, waviness and roughness, are examined. It is noted that the separation tool of surface irregularities in the range of change "from micro to macro" is to filter the profilogram digital signal obtained using computerized equipment. Step by step technique and examples of profilogram digital processing in the experimental study of the milled surface are given.

1. Постановка проблеми. Качество обработанной поверхности характеризуется параметрами её микро- и макрогеометрии и наряду с показателями точности обработки определяет эксплуатационные свойства

деталей и узлов машин. Возникающие в упругой системе станка вибрации также оказывают влияние на шероховатость и волнистость обработанной поверхности. Одновременное измерение и спектральный анализ колебаний в упругой системе станка и частотного состава профилограммы обработанной поверхности позволяет находить взаимосвязь между ними и на этой основе диагностировать технологическую систему лезвийной и абразивной обработки на станках с ЧПУ. В этой связи применение частотного подхода к анализу указанных физических явлений разной природы (вибраций при обработке и частотного состава профилограммы обработанной поверхности) относится к числу актуальных задач в технологии машиностроения.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Вопросам «безопорного» (skidless) измерения и анализа шероховатости, волнистости и отклонения формы поверхности на измерительной станции с ЧПУ типа HOMMEL TESTER T8000C, работающей в соответствии с европейскими и американскими стандартами, в отечественной литературе не уделено должного внимания. Имеющиеся исследования [1, 2, 3] не соответствуют современному состоянию вопроса. Методики измерения, основанные на частотном методе и цифровой фильтрации, также не отражены или отражены частично [4].

3. Цель исследования заключается в апробировании методики измерения параметров шероховатости и волнистости поверхности в соответствии с зарубежными стандартами при экспериментальном исследовании плоского фрезерования образцов на станке мод. 500V/5 (обрабатывающий центр с ЧПУ).

4. Материалы исследований. В процессе резания на металлорежущих станках обрабатываемая заготовка является замыкающим звеном в упругой технологической системе резания и образует с режущим инструментом кинематическую пару. Относительное движение детали и режущего инструмента определяет постоянную и переменную составляющие выполняемого при обработке размера. Постоянная составляющая размера и допускаемое отклонение от него указываются на операционном эскизе заготовки или на чертеже детали. Переменная составляющая размера характеризует качество обработанной поверхности

и рассматривается на уровне макро- и микроотклонений, под которыми понимают отклонение формы обрабатываемой поверхности от требуемой по чертежу и шероховатость поверхности. Переходную зону между макро- и микроотклонениями называют волнистостью обработанной поверхности. Например, при плоском фрезеровании концевой фрезой отклонением формы является отклонение от плоскостности, которое можно обнаружить в пределах обработанной поверхности при условии, что там же находится измерительная база для контроля этого отклонения. Непредусмотренный при настройке станка наклон обработанной плоскости по отношению к горизонтальной плоскости может быть вызван погрешностью установки заготовки. Этот наклон характеризует погрешность взаимного расположения поверхностей. Эта погрешность относится не к обработанной поверхности (плоскости), а к заготовке в целом. Поэтому её не включают в показатели качества поверхности, если особо не оговорена необходимость получения горизонтально расположенной плоскости.

Аналогичные рассуждения можно привести применительно к обработке цилиндрической поверхности, когда отклонением формы цилиндрической поверхности считают отклонения от круглости в отдельно взятых поперечных сечениях заготовки (измерительная база находится на контуре контролируемого сечения). В то же время конусность относится не только к погрешности формы заготовки, но также к погрешности формы цилиндрической поверхности (конус вместо цилиндра), так как для выявления конусности можно найти измерительную базу на обработанной цилиндрической поверхности.

Представление формируемого при механической обработке размера в виде суммы постоянной и переменной составляющей этого размера соответствует частотному подходу в анализе микро – и макронеровностей, позволяющему путём фильтрации сигнала, характеризующего выполняемый размер, выделять параметры точности (постоянная составляющая) и качества (переменная составляющая) обработанной поверхности. Тот же самый частотный подход принято использовать при анализе вибраций в замкнутой упругой системе металлорежущего станка. Это позволяет с единых позиций рассматривать в частотной области разные по физической природе явления: макро – и микрогеометрию

обработанной поверхности, и динамический колебательный процесс (вибрации) в упругой системе металлорежущего станка, в котором выполняемый размер является замыкающим звеном замкнутой размерной цепи. Это позволяет установить (в одной и той же частотной области) детерминированные и корреляционные связи между указанными явлениями разной физической природы, происходящими в одно и то же время при обработке заготовке на станке, для того чтобы в последующем управлять процессом обработки. Это управление может быть основано на использовании встроенной системы технологической вибродиагностики, позволяющей по анализу возникающих в упругой системе виброакустических колебаний обеспечивать требуемую макро- и микрогеометрию обработанной поверхности, включая её волнистость. Или не допускать нежелательных частотных составляющих в спектре макро- и микронеровностей обработанной поверхности.

Таким образом, критерием разграничения показателей качества поверхности от других показателей точности обработки, относящимся к заготовке, является факт наличия измерительной базы на обработанной поверхности, что уже само по себе характеризует колебательную (по отношению к имеющейся измерительной базе) природу показателей макро- микрогеометрии. В этой связи в последние годы в соответствующих европейских (DIN) и американских (ASME) стандартах принята концепция «частотного подхода» к анализу и измерению отдельных составляющих макро- и микрогеометрии обработанных поверхностей, включая переходную зону – волнистость поверхности. В зарубежной литературе эта концепция получила название «концепция пертометра» или *Perthometer concept*. Она нашла отражение в указанных зарубежных стандартах. Сущность концепции заключается в рассмотрении абстрактного «элемента профиля», который может быть найден при анализе шероховатости, волнистости и отклонении формы поверхности, соответственно на высокой, средней и низкой частоте, которая обратно пропорциональна периоду (шагу) повторения этого элемента. Программное обеспечение пертометра работает в операционной системе Windows, что делает доступным для обработки сигналов все стандартные приложения Windows.

В этой связи вводится понятие периодического (регулярного) и аperiodического (нерегулярного) профиля, что применительно к шероховатости поверхности показано на рис. 1.

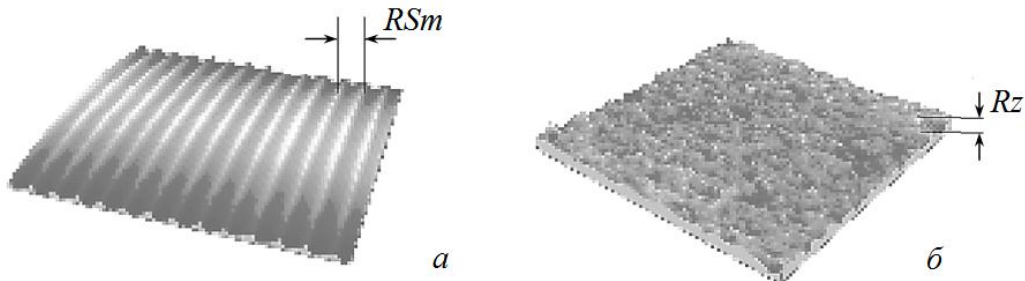


Рисунок 1 – Периодический (а) и аperiodический (б) профиль в топографии шероховатости обработанной поверхности [1]: RSm и Rz шаговый и высотный параметры профиля

Сущность идеи частотного разделения составляющих, характеризующих разные группы показателей качества обработанной поверхности (шероховатость, волнистость, отклонение формы), заключается в последовательной цифровой фильтрации сигнала, выработанного датчиком безопорным щупа (skidless probe) в процессе измерения (рис. 2).

Особенностью частотного подхода в оценке качества обработанной поверхности заключается в том, что измерения составляющих отклонения профиля производятся после соответствующей частотной фильтрации. Например, так оценивают показанные на рис. 2 максимальные отклонения соответствующих профилей (Pt , Wt и Rt) на интервале измерения ln . Поэтому, всякие искажения этих и других составляющих не только по амплитуде, но и по фазе, приведут к ложной их оценке. Наиболее трудоёмкой частью проектирования соответствующих частотных фильтров является обеспечение фазовой коррекции (phase correcting) составляющих после их прохождения через фильтр. Это вызвано тем, что известные сегодня структуры цифровых КИХ (конечная импульсная характеристика) и БИХ (бесконечная импульсная характеристика) фильтров в полосе пропускаемых частот изменяют фазу составляющих гармоник, соответственно, линейно (КИХ фильтр) и нелинейно (БИХ фильтр). Это вызывает так называемую групповую (группа гармоник в полосе пропускаемых фильтром частот) задержку выходного сигнала

фільтра, т.е. искаження его вихідного сигналу. Наприклад, якщо вихідний сигнал характеризує хвилюватість, то хвиля на виході фільтра искажена як по формі, так і по положенню в системі координат обробленої поверхності. В ряду випадків (показано нижче) застосування успішної математическої процедури згладжування (smoothing) профілограми для виявлення хвилюватості поверхності може дати більш високу точність оцінки параметрів хвилі, приблизену до результатів вимірювання даних на виході фазокоректованого фільтра (phase correct filter).

В стандарті DIN EN ISO 4288, в відповідності з яким працює станція T8000, передбачено величину відсічки кроку, рівну базовій довжині, вибирати з урахуванням виду вимірюваного профілю: періодичний профіль або аперіодический (табл. 1).

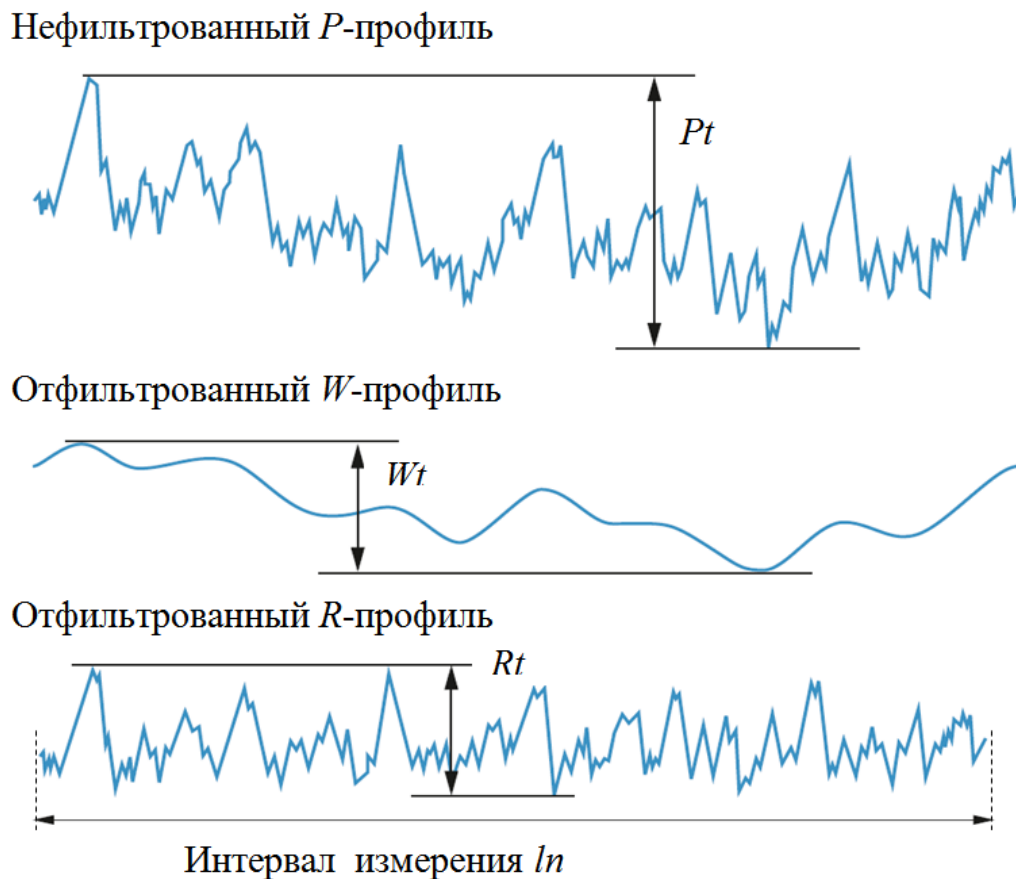


Рисунок 2 – Виділення отфільтрованого профілю хвилюватості (W -профіль) і шерохватості (R -профіль) із первинного (prime profile) нефільтрованого профілю (P -профіль) [1]

Таблица 1 – Выбор длины трассирования lt , базовой длины lr и длины оценки ln по стандарту DIN EN ISO 4288

Периодический профиль	Апериодический профиль		Отсечка шага	Базовая длина/длина оценки	Длина трассирования
RSm , мм	Rz , мкм	Ra , мкм	λ_s , мм	lr / ln	lt , мм
0,013 - 0,04	0,025- 0,1	0,006-0,02	0,08	0,08/0,4	0,48
0,04 - 0,13	0,1 - 0,5	0,02 - 0,1	0,25	0,25/1,25	1,5
0,13 - 0,4	0,5 - 10	0,1- 2	0,8	0,8/4	4,8
0,4 - 1,3	10 - 50	2 - 10	2,5	2,5/12,5	15
1,3 - 4,0	50 - 200	10 - 80	8	8/40	48

Сначала определяют длину трассирования lt и длину оценки ln , которая меньше lt на длину начального и конечного участков траектории перемещения щупа. Начальный и конечный участки исключаются из рассмотрения, так как на этих участках щуп движется с переменной скоростью и возможны ошибки измерения. Для получения волнограммы поверхности, т.е. низкочастотной составляющей неровностей первичного профиля, в современных измерительных станциях используют фазокорректированный фильтр низкой частоты (W -профиль на рис. 2). Далее из первичного нефильтрованного профиля (P -профиль на рис. 2) для каждой точки интервала измерения ln (абсцисса графика на рис. 2) находят разность ординат P -профиля и W -профиля, которая характеризует шероховатость обработанной поверхности (R -профиль на рис. 2). Если найденные при автоматическом измерении значения параметров Rz и Ra находятся в соответствующих интервалах их изменения (табл. 1), то измерения считается законченным. В противном случае необходимо изменить базовую длину при той же длине трассирования и длине измерения и снова определить параметры Rz и Ra .

Для исследования влияние режимов фрезерования на геометрические неровности профиля и для установления связи их с вибрациями в технологической системе проведены экспериментальные исследования процесса плоского фрезерования на станке мод. 500V/5 (обрабатывающий центр с ЧПУ Siemens 840D). В качестве образцов для фрезерования

использованы призматические заготовки 65 x 50 x 30 мм из стали марки Ст3. Противоположные боковые плоские грани этих образцов последовательно фрезеровали концевой фрезой диаметром 18 мм с числом зубьев 4 из быстрорежущей стали Р6М5 (рис. 3).

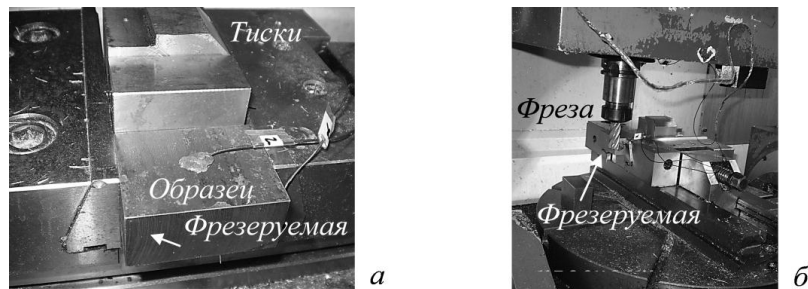


Рисунок 3 – Установка призматического образца в тисках (а) с закрепленными на нём датчиками виброускорения AP2019 и технологическая наладка (б) для станка мод. 500V/5

Измерение профиля обработанной поверхности производили с помощью станции контроля Hommel Tester 8000 фирмы JENOPTIK (далее Т8000) в режиме измерения шероховатости и волнистости (рис. 4).

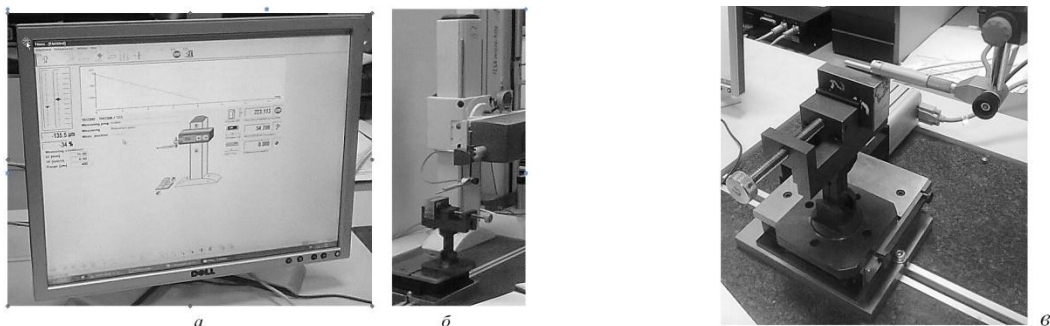


Рисунок 4 – Настройка станции Т8000 на измерение шероховатости после установки в тиски призматического образца № 5.2:

а – схема настройки (на мониторе прибора) при управлении перемещением контактного щупа; б – вертикальное перемещение контактного щупа перед касанием с образцом № 5.2; в – исходное положение датчика перед измерением

Результаты измерения параметров шероховатости фрезерованной поверхности систематизированы в зависимости от режимов фрезерования для удобства установления влияния режимов (табл. 2...табл. 4). Каждая найденная экспериментально оценка параметра шероховатости является

средней величиной, заменяющей два результата экспериментального определения параметра. Для этого каждый опыт фрезерования поверхности дублировали, обрабатывая противоположные грани призматических образцов (рис. 3). Кроме того, каждый опыт измерения шероховатости на указанных противоположных гранях образцов также дублировали при измерении шероховатости (рис. 4).

Таблица 2 – Влияние подачи на зуб на шероховатость поверхности

Влияние режима / Вид профиля	Номер образца	Ra мкм	Rz мкм	R max мкм
1	2	3	4	5
S_Z $t_{\min} = 0,5$ мм $n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ Апериодический	$S_{Z \min} = 0,15$ мм/зуб			
	2	3,543	18,506	26,884
	$S_{Z \max} = 0,30$ мм/зуб			
	8	3,827	20,789	26,043
S_Z $t_{\max} = 1,0$ мм $n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ Апериодический	$S_{Z \min} = 0,15$ мм/зуб			
	4	3,235	19,355	26,208
	$S_{Z \max} = 0,30$ мм/зуб			
	6	4,712	24,688	30,136

Таблица 3 – Влияние глубины резания на шероховатость (продолжение табл.2)

1	2	3	4	5
t $S_{Z \min} = 0,15$ мм/зуб $n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ Апериодический	$t_{\min} = 0,5$ мм			
	2	3,543	18,506	26,884
	$t_{\max} = 1,0$ мм			
	4	3,235	19,355	26,208
t $S_{Z \min} = 0,15$ мм/зуб $n_{\max} = 3800$ мин ⁻¹ Периодический	$t_{\min} = 0,5$ мм			
	5	1,115	5,900	6,663
	$t_{\max} = 1,0$ мм			
	7.1	0,945	5,309	6,314
t $S_{Z \max} = 0,30$ мм/зуб $n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ Апериодический	$t_{\min} = 0,5$ мм			
	8	3,827	20,789	26,043
	$t_{\max} = 1,0$ мм			
	6	4,712	24,688	30,136

Таблица 4 – Влияние частоты вращения фрезы на шероховатость (продолжение табл.2 и табл.3)

1	2	3	4	5
n $S_{Z\min} = 0,15$ мм/зуб $t_{\min} = 0,5$ мм	$n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ <i>Аперидический</i>			
	2	3,543	18,506	26,884
	$n_{\max} = 3800$ мин ⁻¹ <i>Периодический</i>			
	5	1,115	5,900	6,663
n $S_{Z\min} = 0,15$ мм/зуб $t_{\max} = 1,0$ мм	$n_{\min} = 950$ мин ⁻¹ <i>Аперидический</i>			
	4	3,235	19,355	26,208
	$n_{\max} = 3800$ мин ⁻¹ <i>Периодический</i>			
	7.1	0,945	5,309	6,314

Установлено, что при фрезеровании возможно получение двух видов профилей: периодического и аперидического (рис. 1). Периодическим профилем будем называть такой профиль, у которого неровности имеют приблизительно постоянный шаг и приблизительно одну и ту же высоту. Соответственно аперидическим профилем называем сочетание неровностей, которое имеет разный шаг и разную высоту на интервале их оценки. Оба вида профилей – периодический и аперидический – отражены в табл. 2...табл. 4.

В качестве примера можно привести профилограммы двух образцов, имеющих аперидический и периодический профили, в том виде, как их подготавливает станция Т8000 (рис. 5). В обоих случаях длина пути трассирования контактного щупа составляет $lt = 15$ мм, длина оценки $ln = 12,5$ мм, базовая длина для оценки шероховатости $lr = \lambda c = 2,5$ мм, причём $ln = 5 \times lr$ и $lt = ln + 2lr$. Отличие длины измерения ($ln = 12,5$ мм) от пути трассирования ($lt = 15$ мм) вызвано тем, что начальный длиной $l_1 = 2,5$ мм и конечный длиной $l_2 = 2,5$ мм участки не используются для измерения, так как на этих участках измерительный щуп движется с переменной линейной скоростью (это отмечалось выше).

Для образцов № 2 и № 5 (рис. 5), имеющих аперидический (№ 2) и периодический (№ 5) профиль, выбор базовой длины, длины измерения (оценки) и длины трассирования выполнен с учетом требований табл. 1. Первоначально, произвольно выбираем указанные выше параметры и выполняем измерение параметров шероховатости с помощью

станції Т8000. С урахуванням факта періодичності або аперіодичності профіля, коректуємо вибрані базову довжину, довжину оцінки і довжину трасування в відповідності з табл. 1. Наприклад, для зразка № 5, маючого періодичний профіль в відповідності з профілограммою (рис. 5, б) крок між висунуттями становить $RSm = 0,6$ мм. Отже, $l_r = 2,5$ мм; $l_n = 12,5$ мм; $l_t = 15$ мм.

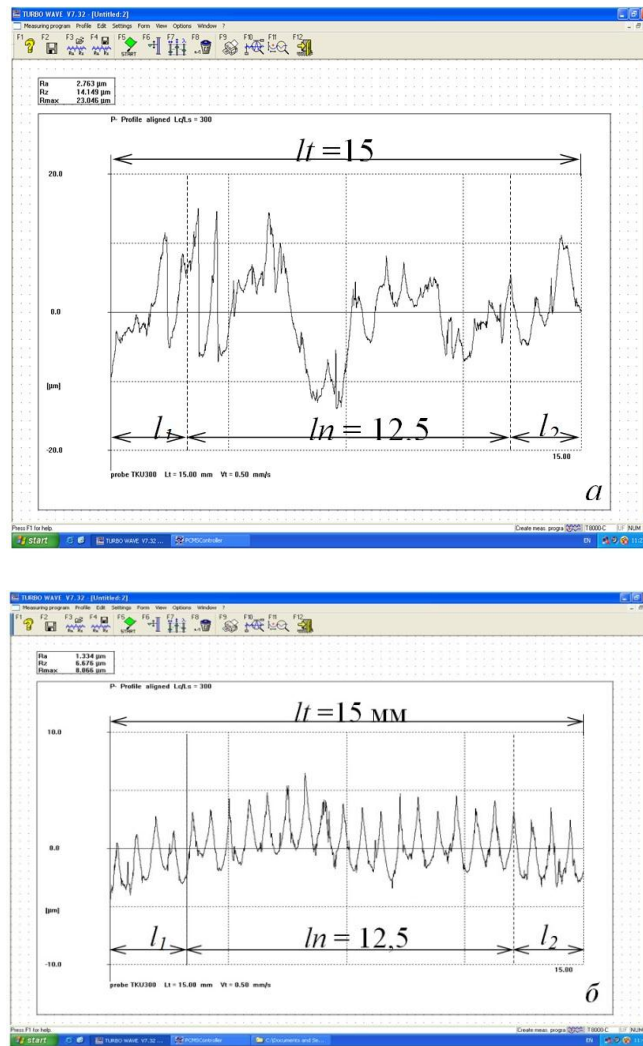


Рисунок 5 – Профілограмми поверхностей зразків № 2.1 і № 5.1, маючих аперіодический (а) і періодический (б) профілі мікронервностей

Из анализа табл. 2, 3 и 4 видно, что доминирующим элементом режима резания, влияющим на параметры шероховатости, является частота вращения шпинделя, в то время как подача на зуб фрезы и глубина

резания оказывают незначительное влияние на изменение шероховатости. Действительно, при увеличении подачи на зуб (табл. 2) шероховатость поверхности, увеличивается, или мало изменяется. Изменение глубины резания (табл.3) мало влияет на шероховатость поверхности. В то же время при увеличении скорости резания (табл. 4) шероховатость поверхности существенно уменьшается. Кроме того, изменение частоты вращения фрезы в диапазоне от 950 мин^{-1} до 3800 мин^{-1} (табл. 3 и табл. 4) является причиной появления на поверхности заготовки периодического профиля.

Выявленная периодичность микронеровностей на поверхности образца № 5.1 относится по принятой классификации геометрических характеристик качества поверхности [6] к волнистости. Действительно, отношение шага S элемента профиля к его высоте R изменяется в интервале от $620 \text{ мкм} / 6 \text{ мкм}$ до $600 \text{ мкм} / 5 \text{ мкм}$ (рис.5, б), т.е. величина отношения составляет $103 \dots 120$.

Известно [2], что шаг S волнистости зависит от подачи на один оборот фрезы. Для образца № 5.1 подача на один зуб фрезы составляет $S_z = 0,15 \text{ мм/зуб}$. Следовательно, $S_{об} = 0,15 \cdot 4 = 0,6 \text{ мм/об}$, т.е. шаг неровностей равен оборотной подаче.

Время фрезерования в секундах, соответствующее пути $0,6 \text{ мм}$ (величина $S_{об}$), составляет $T = (60 \cdot 0,6) / (3800 \cdot 0,15 \cdot 4) = 0,015794 \text{ с}$. Время одного оборота фрезы составляет $T = 60 / 3800 = 0,015794 \text{ с}$. Таким образом, одна впадина периодического профиля образована фрезой за время одного её оборота.

5. Выводы и перспективы развития.

1. Представление формируемого при механической обработке размера в виде суммы постоянной и переменной составляющей этого размера соответствует частотному подходу в анализе профилограммы обработанной поверхности, позволяющему путём фильтрации сигнала, характеризующего выполняемый размер, выделять параметры точности (постоянная составляющая) и качества (переменная составляющая) обработанной поверхности.

2. Тот же самый частотный подход принято использовать при анализе вибраций в замкнутой упругой системе металлорежущего станка. Это позволяет с единых позиций рассматривать в одной и той же

частотной области разные по физической природе явления: формирование макро- и микрогеометрии обработанной поверхности, и динамический колебательный процесс (вибрации) в упругой системе металлорежущего станка, в котором выполняемый размер является замыкающим звеном замкнутой размерной цепи.

4. При увеличении подачи на зуб фрезы шероховатость поверхности, увеличивается, или мало изменяется. Изменение глубины резания мало влияет на шероховатость поверхности. При увеличении скорости резания шероховатость поверхности уменьшается и переходит в волнистость с периодическим профилем.

5. Применение частотного метода к анализу шероховатости и волнистости поверхности, с одной стороны, и к анализу вибраций в технологической системе с другой – позволит устанавливать детерминированные и корреляционные связи между вибрациями и параметрами качества обработанной поверхности.

Список использованных источников: 1. *Карташев А.И.* Шероховатость поверхности и методы её измерения. Под ред. канд. физ.-мат. наук Ю.В. Коломийцева. – М.: Изд-во гос. комитета стандартов, мер и измерит. приборов, 1964. – 163 с. 2. *Лоповок Т.С.* Волнистость поверхности и её измерение. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 184 с. 3. *Дунин-Барковский И.В.* Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / *И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова.* – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с. 4. *Табенкин А.Н.* Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / *А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов.* Под ред. канд. техн. наук *Н.А. Табачниковой.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 136 с. 5. Roughness measuring systems from Jenoptik – Surface texture parameters in practice [Electronic resource]. – Available on: <http://www.jenoptik.com/en-roughness-measurement-and-contour-measurement> Friday, 17 July 2015 12:09:07. 6. *Гжиров Р.И.* Краткий справочник конструктора: Справочник. – Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Kartashev A.I.* Sherokhovatost' poverkhnosti i metody ee izmereniya. Pod red. kand. fiz.-mat. nauk *Yu.V. Kolomiytseva.* – M.: Izd-vo gos. komiteta standartov, mer i izmerit. priborov, 1964. – 163 s. 2. *Lopovok T.S.* Volnistost' poverkhnosti i ee izmerenie. – M.: Izd-vo standartov, 1973. – 184 s. 3. *Dunin-Barkovskiy I.V.* Izmereniya i analiz sherokhovatosti, volnistosti i nekruglosti poverkhnosti / *I.V. Dunin-Barkovskiy, A.N. Kartashova.* – M.: Mashinostroenie, 1978. – 232 s. 4. *Tabenkin A.N.* Sherokhovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyy opyt / *A.N. Tabenkin, S.B. Tarasov, S.N. Stepanov.* Pod red. kand. tekhn. nauk *N.A. Tabachnikovoy.* – SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2007. – 136 s. 5. Roughness measuring systems from Jenoptik – Surface texture parameters in practice [Electronic resource]. – Available on: <http://www.jenoptik.com/en-roughness-measurement-and-contour-measurement> Friday, 17 July 2015 12:09:07. 6. *Gzhirov R.I.* Kratkiy spravochnik konstruktora: Spravochnik. – L.: Mashinostroenie, 1983. – 464 s.