

**RU**

(11)

2 757 336

(13)

C2

(51) МПК

[B23B 1/00 \(2006.01\)](#)

(52) СПК

[B23B 1/00 \(2021.02\)](#)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 20.10.2021)

Пошлина: Установленный срок для уплаты пошлины за 3 год: с 01.02.2021 по 31.01.2022. При
уплате пошлины за 3 год в дополнительный 6-месячный срок с 01.02.2022 по 31.07.2022
размер пошлины увеличивается на 50%.(21)(22) Заявка: [2020104626](#), 31.01.2020(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
31.01.2020Дата регистрации:
13.10.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 31.01.2020

(43) Дата публикации заявки: 02.08.2021 Бюл.
№ [22](#)(45) Опубликовано: [13.10.2021](#) Бюл. № [29](#)(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2538750 C2, 10.01.2015. SU
1024161 A1, 23.06.1983. SU 1510983 A1,
30.09.1989. RU 2514251 C2, 27.04.2014. US
5170358 A1, 08.12.1992. JP 2012187691 A,
04.10.2012. JP 2014091187 A, 19.05.2014.

Адрес для переписки:

624130, Свердловская обл., г. Новоуральск,
ул. Дзержинского, 2, ООО "НПО
"Центротех", Генеральный директор
Кавелашвили И.В.

(72) Автор(ы):

Гусев Антон Валерьевич (RU),
Гупалов Борис Алексеевич (RU),
Закураев Виктор Владимирович (RU),
Степанов Павел Иванович (RU)

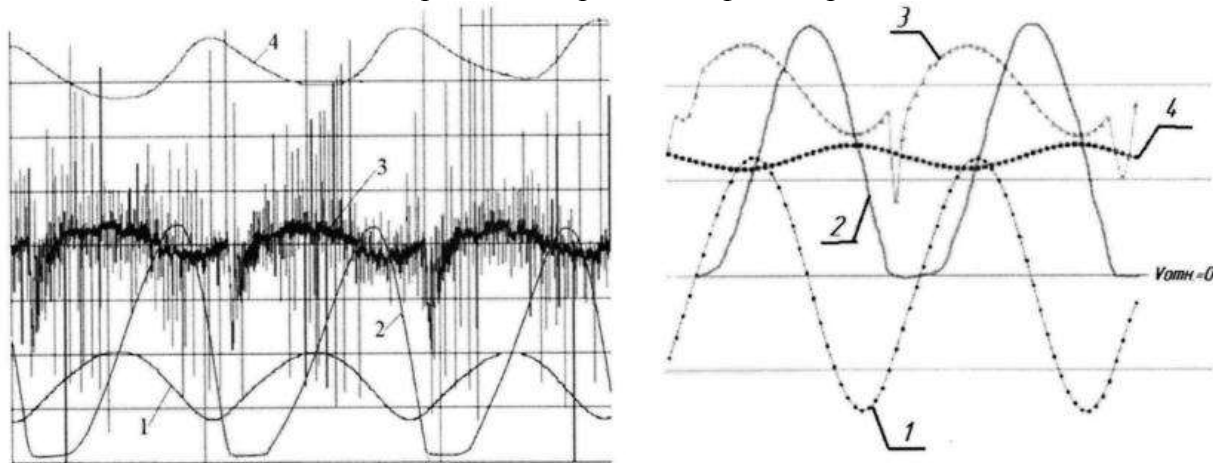
(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной
ответственностью "Научно-
производственное объединение
"Центротех" (ООО "НПО "Центротех")
(RU)

(54) Способ определения оптимальных режимов процесса резания конструкционных сталей

(57) Реферат:

Способ включает измерение частотной характеристики системы, предварительную обработку заготовки из заданного материала при разных скоростях, измерение сигнала виброускорения датчиком, преобразование сигнала в спектр частот. В спектре частот определяют гармонику с максимальной амплитудой, определяют частоту, соответствующую максимальной амплитуде гармоники - f_0 , относительно этой частоты определяют полосу частот $\Delta f = f_0 + f_c$, где f_c - половина полосы частот, равная значению среднеквадратичного отклонения частоты образования сдвиговых деформаций Δx , определяемой по стружкам. Вычисляют спектральную плотность указанной полосы частот. По известному значению частотной характеристики и установленному значению спектральной плотности полосы частот спектральную плотность спектра частот образования фрагментов стружек по приведенному соотношению. Затем находят величину сдвиговой деформации Δx , величины фрагмента стружки, сравнивают величину Δx с толщиной срезаемого слоя - a ; сравнение осуществляют до выполнения условия значения $\Delta x/a$ от 0,9 до 1,1, при котором скорость резания или подача является оптимальной. Снижается трудоемкость определения оптимальных режимов обработки с обеспечением возможности автоматического контроля процесса резания с учетом динамических свойств технологической среды в процессе фомообразования. 6 ил., 2 табл.



Фиг.1

Изобретение относится к области обработки материалов резанием и может быть использовано для определения оптимального режима резания в конкретных условиях обработки на выбранном технологическом оборудовании, а также для оценки качества используемого инструмента и оборудования.

Известен способ определения обрабатываемости материалов резанием за счет регистрации мгновенных сил резания (Авторское свидетельство СССР на изобретение №1510983, «Способ определения обрабатываемости металлов», класс МПК В23В 1/00) [1].

В соответствии с этим способом осуществляют процесс резания, производят запись мгновенных значений тангенциальной составляющей силы резания, на полученной стружке определяют частоту сколов (обусловленных сдвиговыми деформациями) элементов стружки, строят график изменения спектральной плотности мгновенных значений силы резания, исключают из графика интервалы частоты, соответствующей частотам образования сколов элементов стружки и определяют обрабатываемость по оставшейся части графика спектральной плотности

мгновенных значений силы резания по величине площади под кривой спектральной плотности (от нуля до частоты образования элементов стружки).

Недостатком известного способа является значительная трудоемкость за счет измерения параметров стружек, сложности установки силоизмерительного устройства на станке. Кроме того, способ не позволяет определять оптимальные режимы резания в реальном времени процесса формообразования.

Также известен способ определения оптимальных режимов резания, включающий выполнение пробных проходов, получение стружек, измерение толщины элементов стружек Δx (сколов), определение отношения толщины элементов - Δx к толщине срезаемого слоя - a . В качестве оптимального режима резания принимают значение скорости резания или подачи, при которых отношения $\Delta x/a$ находится в пределах $0,9 \div 1,1$ (Патент РФ на изобретение №2514251 «Способ определения оптимальных режимов резания», класс МПК В23В 1/00) [2].

Недостатком данного способа также является значительная трудоемкость, а также отсутствие возможности определять оптимальные режимы резания непосредственно на станке в реальном времени.

Наиболее близким к заявляемому техническому решению по технической сущности, совокупности признаков и достигаемому результату является способ, описанный в патенте РФ на изобретение №2538750 «Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки» (класс МПК В23В 1/00; В28В 25/06; В23Q 15/08) [3].

В соответствии с данным способом, производят предварительную обработку заготовок из заданного материала при различных скоростях резания, измеряют заданные параметры, отображающие износ режущего инструмента, измеряют и записывают вибрационные параметры станка с последующим выделением в записи, посредством полосовых фильтров, высокочастотной и низкочастотной составляющих вибрации, определяют амплитудные значения указанных составляющих, находят отношение упомянутых значений амплитуд (высокочастотной и низкочастотной). За величину оптимальной скорости принимают скорость, при которой отношение значений амплитуд является минимальным.

Основным недостатком рассматриваемого способа является определение только одного параметра режима резания - скорости резания.

Кроме того, не учитываются варьирование величины рабочей подачи, амплитудные значения вибросигналов, как высокочастотной, так и низкочастотной составляющей являются не полной характеристикой процесса вибрации. Наиболее полной характеристикой процессов вибрации является спектральная плотность, описанная в авторском свидетельстве СССР №1510983 (запись в первом абзаце).

Задачей заявляемого способа определения оптимальных режимов процесса резания конструкционных сталей в процессе механической обработки является снижение трудоемкости определения оптимальных режимов обработки процесса резания с учетом динамических свойств технологической среды в процессе формообразования.

На фиг. 1 приведен фрагмент графика изменения основных параметров записи автоколебательного процесса от времени резания.

По оси абсцисс - время процесса; по оси ординат - параметры автоколебательного процесса: 1 - смещение резца и заготовки; 2 - относительная скорость смещения резца; 3 - изменение силы резания во времени; 4 - средняя температура в контакте резца и стружки.

На фиг. 2-а приведена фотография корня стружки и на фиг. 2-б схема формирования пластически-деформируемого фрагмента стружки толщиной Δx .

На фиг. 3 - фотографии стружек, полученные на электронном микроскопе, сторона, противоположная прирезочной: а - увеличение $\times 56$; б - увеличение $\times 200$.

На фиг. 4 приведена схема мобильного измерительного комплекса. На фиг. 5а, б приведена запись одной реализации вибросигнала при обработке заготовки (временная область - а) и показан частотный спектр вибросигнала данной реализации - б.

На фиг. 5 в показан участок спектра, соответствующий максимальной частоте $f_0 = 2200$ Гц, на данном режиме резания: а - реализация вибросигнала при обработке заготовки (временная область); б - частотный спектр вибросигнала; в - выделенный участок спектра с максимальной частотой $f_0 = 2200$ Гц.

На фиг. 6 приведены графики испытания инструмента на износ.

Поставленная техническая задача решается путем предварительного определения частотной характеристики системы $H(f)$, например, посредством измерения декремента затухающих колебаний, предварительной обработкой резанием на станке заготовки из заданного материала при разных скоростях резания или подачах, измерения для каждой скорости резания или подачи сигнала виброускорения датчиком и преобразованием сигнала вибропреобразователя в спектр частот и построение графика спектра. В спектре частот на каждой скорости или подаче определяют гармонику с максимальной амплитудой, определяют частоту, соответствующую максимальной амплитуде гармоники - f_0 , и относительно этой

частоты вычисляют значение полосы частот Δf :

$$\Delta f = f_0 \pm f_c, \quad (1)$$

где f_0 - частота, соответствующая максимальной амплитуде гармоники;
 f_c - половина полосы частот, соответствующая максимальной амплитуде гармоники.

$f_c = \sigma_f$, где σ_f - значение частоты, соответствующее среднеквадратичному отклонению частоты образования фрагментов стружек - Δx (для конструкционных сталей экспериментально определено $\sigma_f = 1100$ Гц).

Вычисляют значение спектральной плотности вибросигнала G_y указанной полосы частот - Δf .

$$G_y = \frac{A^2}{\Delta f} \quad (2)$$

где A - среднеквадратичное значение амплитуд сигнала вибропреобразователя.

По определенному значению частотной характеристики системы $H(f)$ и вычисленному значению спектральной плотности сигнала G_y находят спектральную плотность спектра частот образования фрагментов стружек - G_x (вход системы).

$$G_x = \frac{G_y}{H(f)}. \quad (3)$$

По соотношению

$$\Delta x = (G_x \cdot \Delta f)^{1/2} \quad (4)$$

находят величину Δx сдвиговой деформации (величину сегмента стружки), сравнивают величину Δx с толщиной срезаемого слоя - a . При этом в качестве оптимальной, выбирают скорость резания или подачу, при которой выполняется условие значения $\Delta x/a$ от 0,9 до 1,1.

В заявляемом способе содержится два этапа:

1) В спектре частот, полученном на каждой скорости резания, находят гармонику с максимальной амплитудой. Величина гармоники с максимальной амплитудой соответствует частоте образования фрагментов (сколов) стружки на данном режиме (факт установлен экспериментально и обоснован теоретически).

Причина появления пика с максимальной амплитудой гармоники следующая. При резании материалов, обладающих запасом пластичности (относительное удлинение $\psi > 10\%$), процесс стружкообразования имеет циклический характер.

Деформационный цикл образования локального элемента стружки включает следующую последовательность: сжатие локального объема, упрочнение материала под действием деформации сжатия (в материал «закачивается» внешняя энергия; разогрев локального объема (условия адиабатические) с последующим сдвигом фрагмента материала по условной плоскости (поверхности) сдвига за счет теплового размягчения в узкой области; образование нового деформационного цикла (нового фрагмента толщиной Δx).

При высокоскоростной деформации и быстром нагреве ($t_c = 1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-5}$ время сдвига) локального объема материала (толщиной Δx) (при температуре нагрева $T_n = 550 \div 950$ °С) изменяются механические характеристики обрабатываемого материала (упругие модули, предел текучести, предел прочности и др.). Описанные условия создают колебания (автоколебания) сил, действующих в системе резания, фиг. 1 (Корендяев Г.К. «Термомеханическая модель возбуждения автоколебаний при обработке металлов резанием»: автореф. дисс. канд. техн. наук: 01.02.06. Москва, 2012 - 22 с.) [4].

Следует отметить, что процесс стружкообразования, являющийся основным физическим процессом формообразования, осуществляется с наибольшей долей поглощения подводимой внешней энергии. Оставшаяся часть энергии расходуется на процессы трения, происходящие на передней и задней поверхностях лезвия инструмента.

Частота процесса сдвиговых деформаций соответствует частоте образования фрагментов стружки - Δx , фиг. 2 и фиг. 3. Данное положение вытекает из основных соотношений механики процесса резания металлов (В.Ф. Бобров. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. Стр. 102-103) [5].

Величина абсолютного сдвига ΔF , фиг. 2б, определяется по выражению:

$$\Delta F = \varepsilon_0 \cdot \Delta x, \quad (5)$$

где ε_0 - величина относительного сдвига.

Время сдвига:

$$t_c = \frac{\Delta F}{V_c}, \quad (6)$$

где V_c - скорость сдвига.

Заменив в (6) значение ΔF из (5), получаем

$$t_c = \frac{\varepsilon_0 \cdot \Delta x}{V_c},$$

т.е. время сдвига прямо пропорционально величине Δx . Кроме того, данное соотношение подтверждено экспериментально. Так как величина фрагментов Δx коррелирует со временем образования этого фрагмента, а значит и с частотой его образования.

Таким образом, максимальная амплитуда сигнала на полосе частот сдвиговых деформаций всегда соответствует частоте стружкообразования. Этот установленный факт позволяет идентифицировать (определять) частоту стружкообразования на любом режиме резания.

2) По измеренному в данном опыте значению спектральной плотности вибросигнала - G_y (2) и заранее установленной частотной характеристики системы - $H(f)$ (учитывает динамические свойства системы) находится спектральная плотность процесса сдвиговых деформаций (стружкообразования) - G_x (3) (процедура определения G_x описана в примере практической реализации). По вычисленному

значению спектральной плотности спектра частот образования фрагментов стружек - G_x определяется величина сдвиговой деформации фрагмента стружки - Δx (4), а затем сравнивается ее с толщиной срезаемого слоя - a . Сравнение этих параметров осуществляется при каждом изменении скорости резания (подачи) до наступления момента $\Delta x = a$. При этом в качестве оптимальной выбирают скорость резания или подачу, при которой выполняется условие $\Delta x/a$ от 0,9 до 1,1.

Заявляемый способ определения оптимальных режимов процесса резания конструкционных сталей в процессе механической обработки осуществляется следующим образом.

Пример 1. Обрабатывается заготовка из стали 40XH на токарном станке, материал режущей части инструмента твердый сплав P20. Сменная многогранная пластина SNUM - 120412 T2. Режим резания: глубина резания $t=1,5$ мм, рабочая подача $S=0,21$ мм/об; скорость резания изменяется от $V=0,47$ м/с до $V=4,9$ м/с. В первом опыте скорость резания $V=0,47$ м/с. Показанный на фиг. 4 токарный станок (фиг. 4) с установленной в нем обрабатываемой деталью (1) и резцом (2) оснащен мобильным измерительным комплексом, содержащим резцедержатель с датчиком - 3, измерительно-информационную систему, состоящую из: 4 -согласующего устройства, 5 - модуля сбора данных, 6 - монитора.

Посредством мобильного измерительного комплекса, фиг. 4 (либо иным способом) определяется частотная характеристика (передаточная функция) технологической системы, включающей токарный станок, резцедержатель с датчиком (поз. 3) и заготовку (поз.1).

В процессе обработки на стартовом варианте режима резания ($V=0,47$ м/с) осуществляется запись виброускорения датчиком AP 2019 (поз. 3), установленным на резцедержателе станка. Запись сигнала осуществляется модулем сбора данных NI PXI-1042 (поз.5).

Записанная реализация сигналов (временная область) преобразуется в частотный спектр, фигуры 5 а, б и в, который выводится на экран в виде графика (фиг. 5 б). В полученном спектре удаляются значения низких частот (менее 1500 Гц). Из оставшейся части частотного спектра выявляются значения частоты, соответствующей максимальному пику. Указанная частота соответствует центральной частоте процесса фрагментации стружки на данном режиме резания, равная $f_0=2200$ Гц. С учетом вероятностного характера процесса сдвиговых деформаций устанавливается полоса частот - $\Delta f=f_0 \pm f_c$, соответствующая величине «энергетического горба» в данном спектре (ранее экспериментально определено значение $f_c=\sigma_f=1100$ Гц, что соответствует величине стандартного отклонения совокупности величины Δx фрагментов стружек).

Полоса частот $\Delta f=2200 \pm 1100$, т.е. $f_{\max}=f_0+f_c=2200+1100=3300$ Гц. $f_{\min}=f_0-f_c=2200-1100=1100$ Гц. $\Delta f=f_{\max}-f_{\min}=3300-1100=2200$ Гц.

По величине полосы частот (Δf) виброускорения (частот стружкообразования) определяют ее спектральную плотность G_y (2):

$$G_y(f) = \frac{A^2}{\Delta f},$$

где A - среднеквадратичное значение амплитуд сигнала вибропреобразователя; Δf - выделенная полоса частот.

По вычисленному значению G_y и частотной характеристике - H , определяется спектральная плотность спектра частот образования фрагментов стружек G_x (3).

Далее воспользовавшись соотношением (4):

$$\Delta x = (G_x \cdot \Delta f)^{1/2},$$

вычисляется значение величины фрагмента Δx . Это вычисленное значение Δx сравнивается с толщиной срезаемого слоя - a . В данном примере, при заданном

режиме резания $\Delta x=0,137$ мм, $a=0,179$ мм, $\Delta x \neq a$. Условие равенства не выполняется, следовательно, для достижения оптимального режима необходимо изменить скорость резания. Указанная процедура повторяется до тех пор, пока величина фрагмента Δx не сравняется с толщиной срезаемого слоя. В таблице 1 приведены расчетные данные параметров вибрационных и деформационных характеристик процесса резания в соответствии с примером конкретного применения, полученные при последовательном изменении скорости резания до получения результата $\Delta x \approx a$ ($\Delta x=0,176$; $a=0,179$). Этот оптимальный режим достигается при скорости резания $V_0=2,97$ м/с.

Таблица 1 - Расчетные данные параметров вибрационных и деформационных характеристик процесса резания, и соответствие их эксперименту.

Таблица 1

Ско- рость резания V , м/с	Подача S , мм/об	$G_y(f) \cdot 10^{-6}$ $\frac{(м/с^2)^2}{Гц}$	$G_x(f) \cdot 10^{-6}$ $\frac{(м/с^2)^2}{кг}$	f по макси- мальному пику, Гц	f_0 (расчетная по Δx , Гц	Δx (экспе- римент), мм	Δx (опреде- ленная по модели), мм	a , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,47	0,21	11,217	11,517	4450	2200	0,171	0,137	0,179
1,88	0,21	8,13	8,13	7130	4300	0,185	0,147	0,179
2,97	0,21	2,90	2,89	10300	10700	0,175	0,176	0,179
3,8	0,21	1,29	1,318	20350	18500	0,154	0,141	0,179
4,9	0,21	0,34	0,35	27800	27900	0,098	0,099	0,179

Для доказательства оптимальных параметров полученного режима резания по критерию минимального износа инструмента проведены испытания режущего инструмента на износ. Условия испытания соответствуют условиям, приведенным в примере 1.

На фиг. 6 приведены графики, полученные в испытаниях на стойкость (износ) данного инструмента при обработке заготовок из стали 40ХН, $t=1,5$ мм, $S=0,21$ мм/об. Поз. 1 - изменение периода стойкости режущего инструмента от скорости резания, поз. 2 - изменение пути резания от скорости резания, поз. 3 - изменение отношения толщины сдвиговых деформаций к толщине срезаемого слоя $(\Delta x/a)$.

Таким образом, максимум пути резания, минимум относительного износа соответствует скорости резания $V=2,97$ м/с, а отношения $\Delta x/a \approx 1,0$.

Полученные данные подтверждают выполнение задач, на решение которых направлен заявляемый способ.

Пример 2. Условия токарной операции, как и в примере 1. Скорость резания $V=3,8$ м/с. Варьировали значение подачи. После определения фрагмента Δx в стартовом варианте режимов изменяли величину рабочей подачи. В таблице 2 приведены расчетные данные параметров вибрационных и деформационных характеристик процесса резания в соответствии с примером конкретного применения, полученные при варьировании значения подачи от $S=0,075$ до $S=0,3$ мм/об.

Условия $\Delta x=a$ получены при подаче $S=0,15$ мм/об.

Таблица 2 - Расчетные данные параметров вибрационных и деформационных характеристик процесса резания, и соответствие их эксперименту.

Таблица 2

Скорость резания V , м/с	Подача S , мм/об	$G_y(f) \cdot 10^{-6}$ $\frac{(\text{м/с}^2)^2}{\text{Гц}}$	$G_x(f) \cdot 10^{-6}$ $\frac{(\text{м/с}^2)^2}{\text{кг}}$	f по макси- мальному пику, Гц	f_0 (расчетная) по Δx , Гц	Δx (экспе- римент), мм	Δx (опреде- ленная по модели), мм	a , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,8	0,075	0,16	0,18	30310	27200	0,069	0,03	0,064
3,8	0,125	0,56	0,54	23325	23600	0,115	0,123	0,106
3,8	0,15	0,78	0,78	19900	20300	0,127	0,126	0,128
3,8	0,21	1,29	1,318	20350	18500	0,154	0,141	0,179
3,8	0,3	3,09	3,11	15800	12500	0,195	0,173	0,255

Таким образом, заявляемое техническое решение позволяет определять оптимальные значения режима резания, как в случае варьирования скорости резания, а также и изменением рабочей подачи (при невозможности изменения скорости резания).

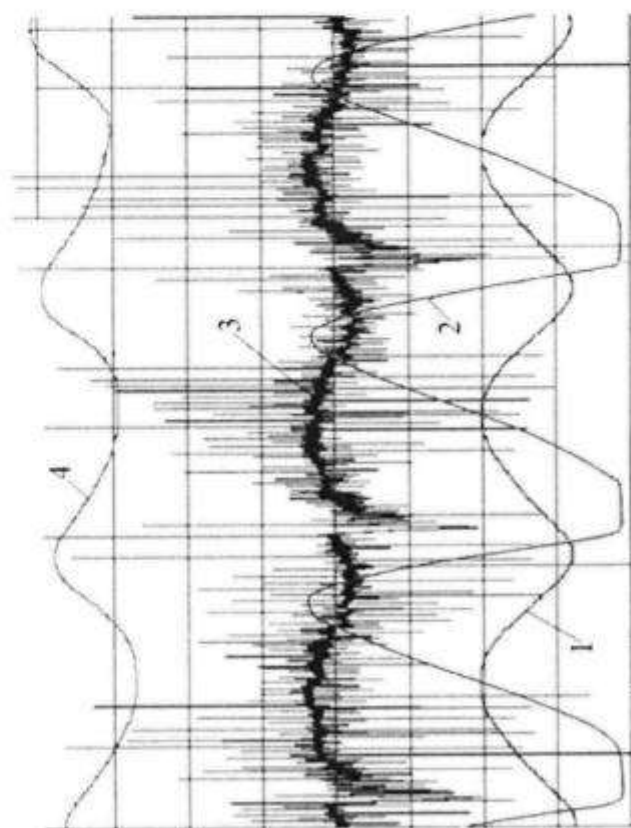
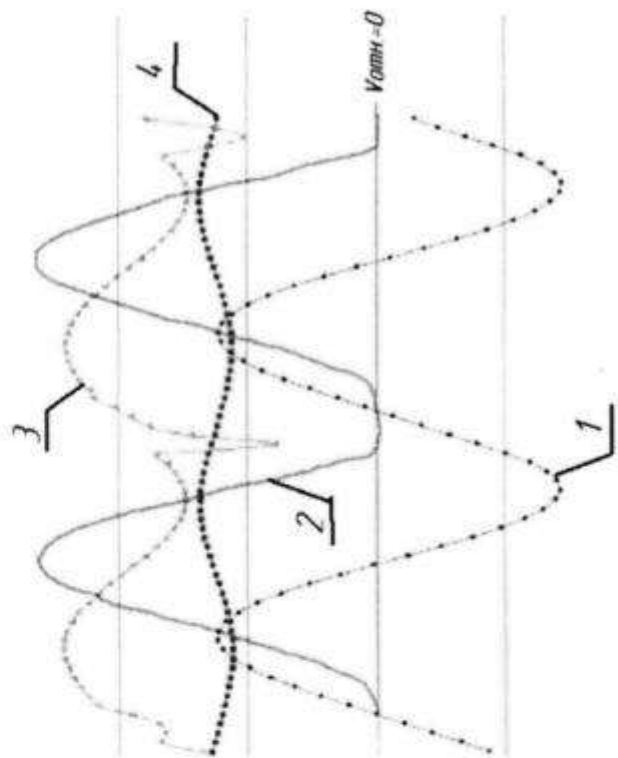
Использование заявляемого способа определения оптимальных режимов процесса резания конструкционных сталей при постановке на производство нового изделия, существенно сокращает время отработки оптимальной технологии, т.е. снижает трудоемкость в целом технологического процесса.

Формула изобретения

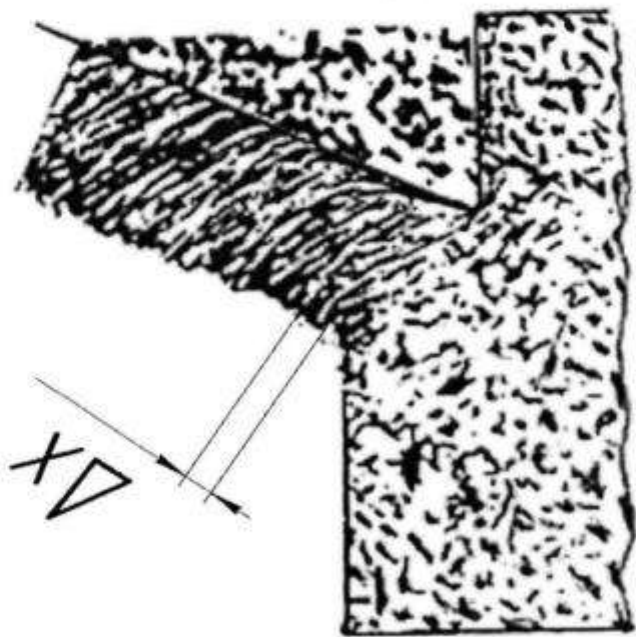
Способ определения оптимальных режимов процесса резания конструкционных сталей в процессе механической обработки, включающий измерение частотной характеристики $H(f)$ системы, содержащей токарный станок, резцедержатель с датчиком и заготовку, предварительную обработку заготовки из заданного материала при разных скоростях резания или подачах, измерение для каждой скорости резания или подачи сигнала виброускорения датчиком и преобразование сигнала вибропреобразователя в спектр частот, отличающийся тем, что в спектре частот определяют гармонику с максимальной амплитудой, определяют частоту, соответствующую максимальной амплитуде гармоники - f_0 , относительно этой частоты определяют полосу частот $\Delta f = f_0 \pm f_c$, где f_c - половина полосы частот, $f_c = \sigma_f = 1100$ Гц - значение частоты, соответствующее среднеквадратичному отклонению частоты образования фрагментов стружек Δx , вычисляют спектральную плотность G_y указанной полосы частот по выражению $A^2/\Delta f$, где A - среднеквадратичное значение амплитуд сигнала вибропреобразователя, затем находят спектральную плотность спектра частот образования фрагментов стружек G_x по выражению $G_x = G_y/H(f)$, а затем по соотношению

$$\Delta x = (G_x \Delta f)^{1/2}$$

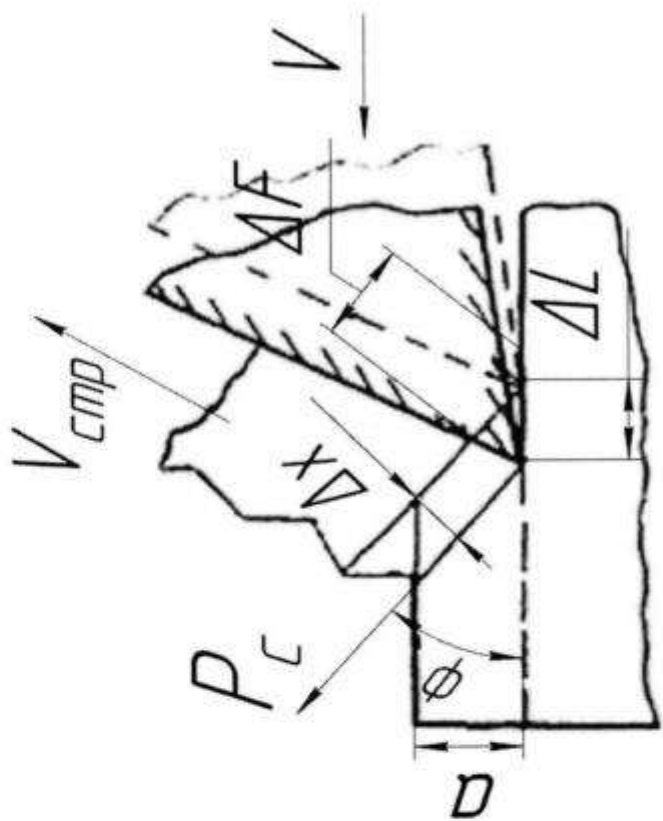
находят величину сдвиговой деформации Δx фрагмента стружки, сравнивают величину Δx с толщиной срезаемого слоя - a , при этом в качестве оптимальную выбирают скорость резания или подачу, при которой выполняется условие $\Delta x/a$ от 0,9 до 1,1.



Фиг.1

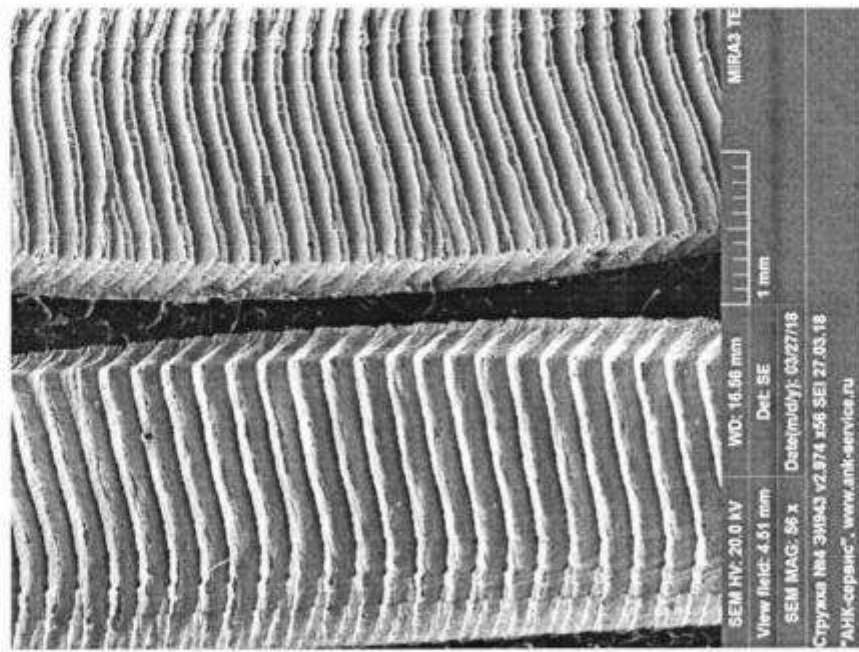
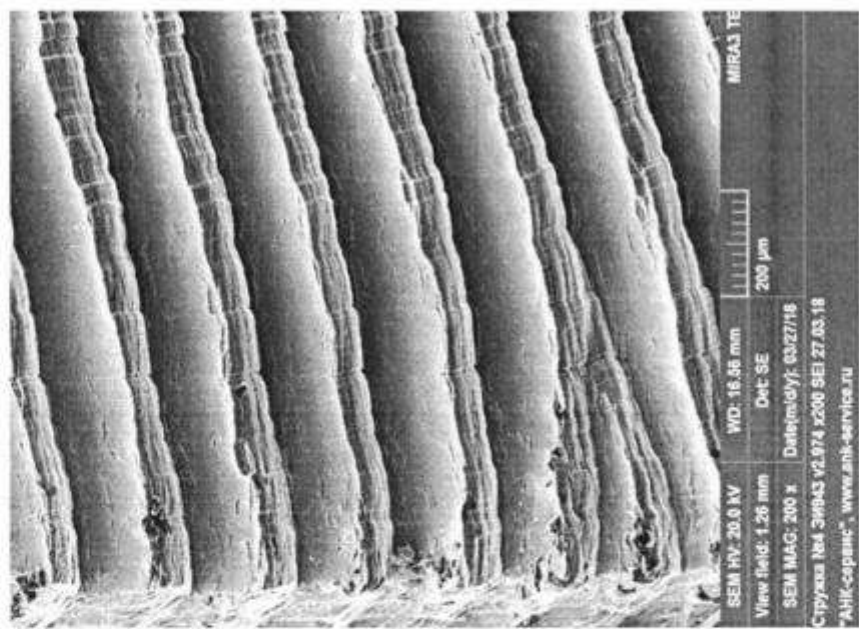


а)

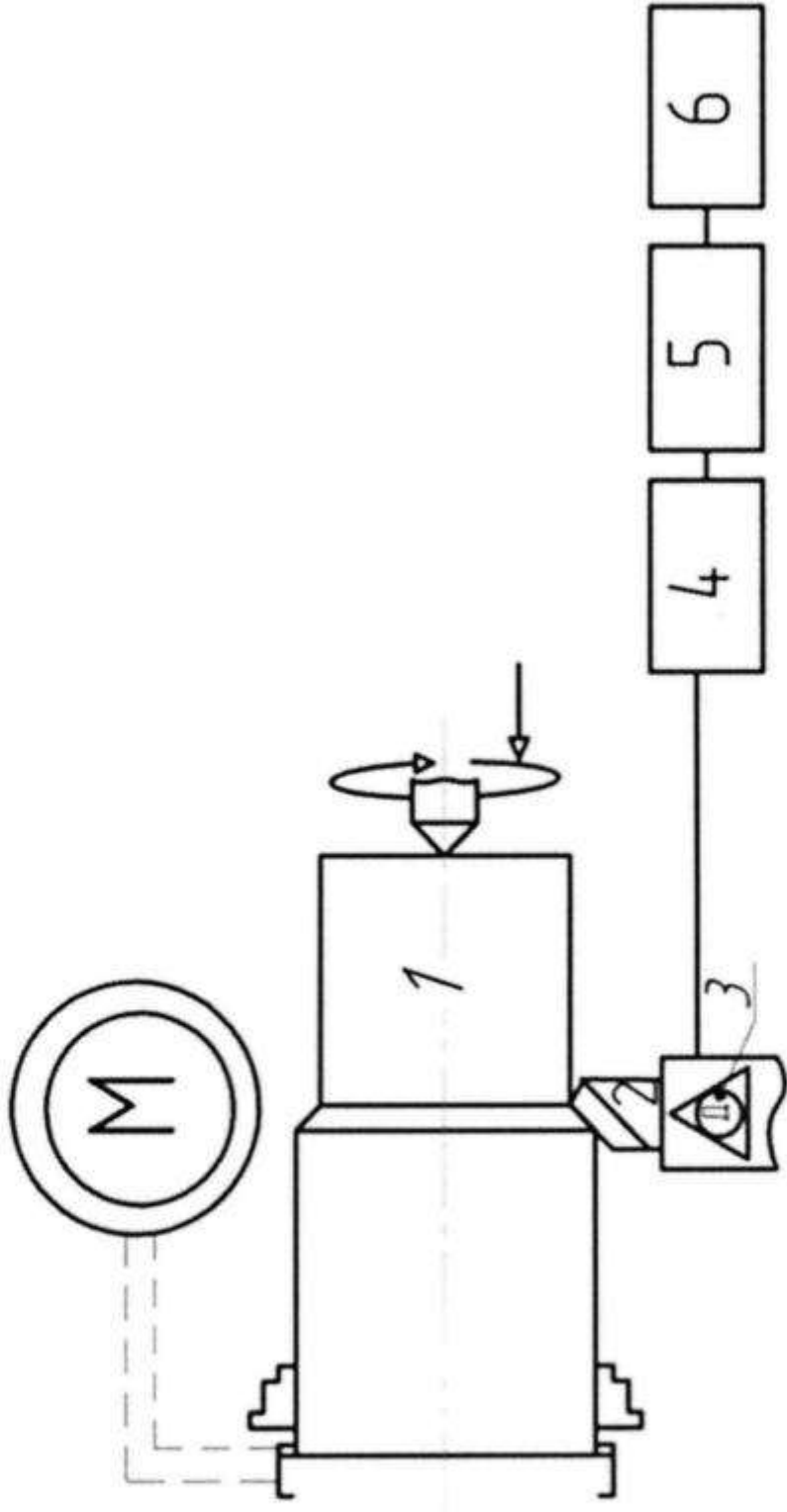


б)

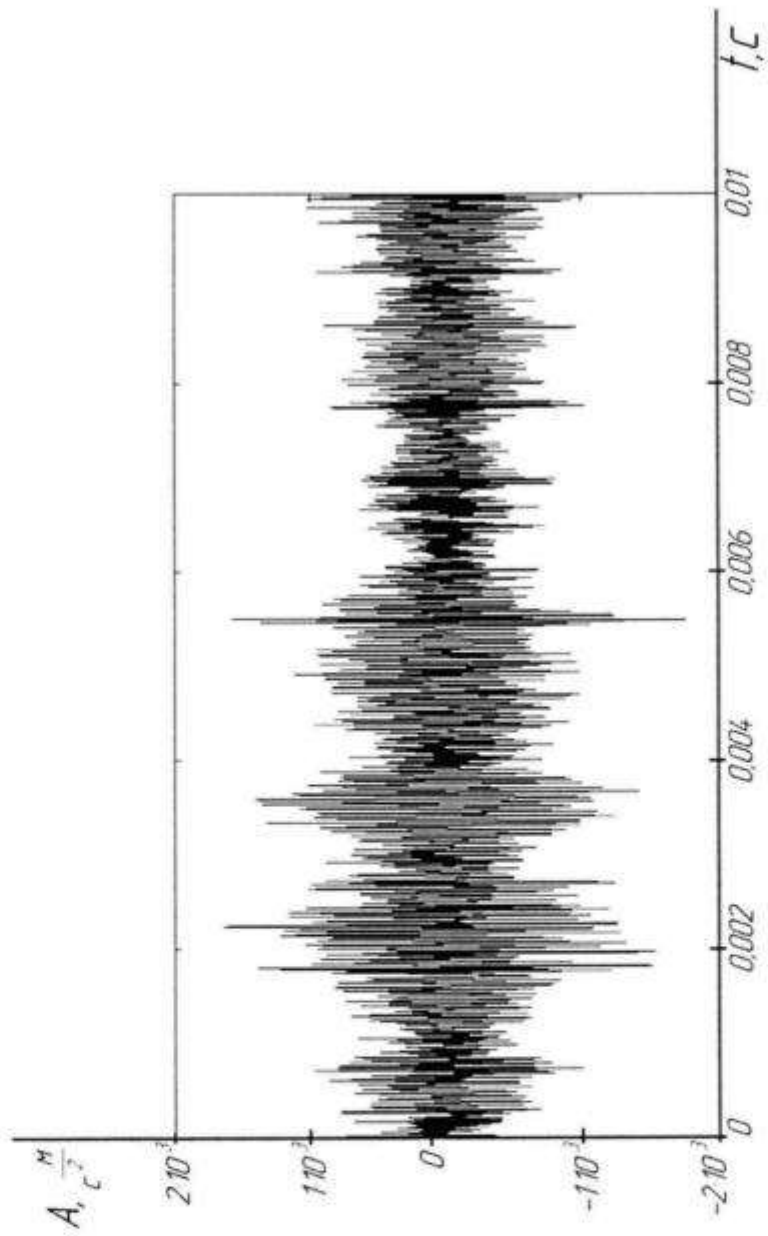
Фиг.2 – а, б



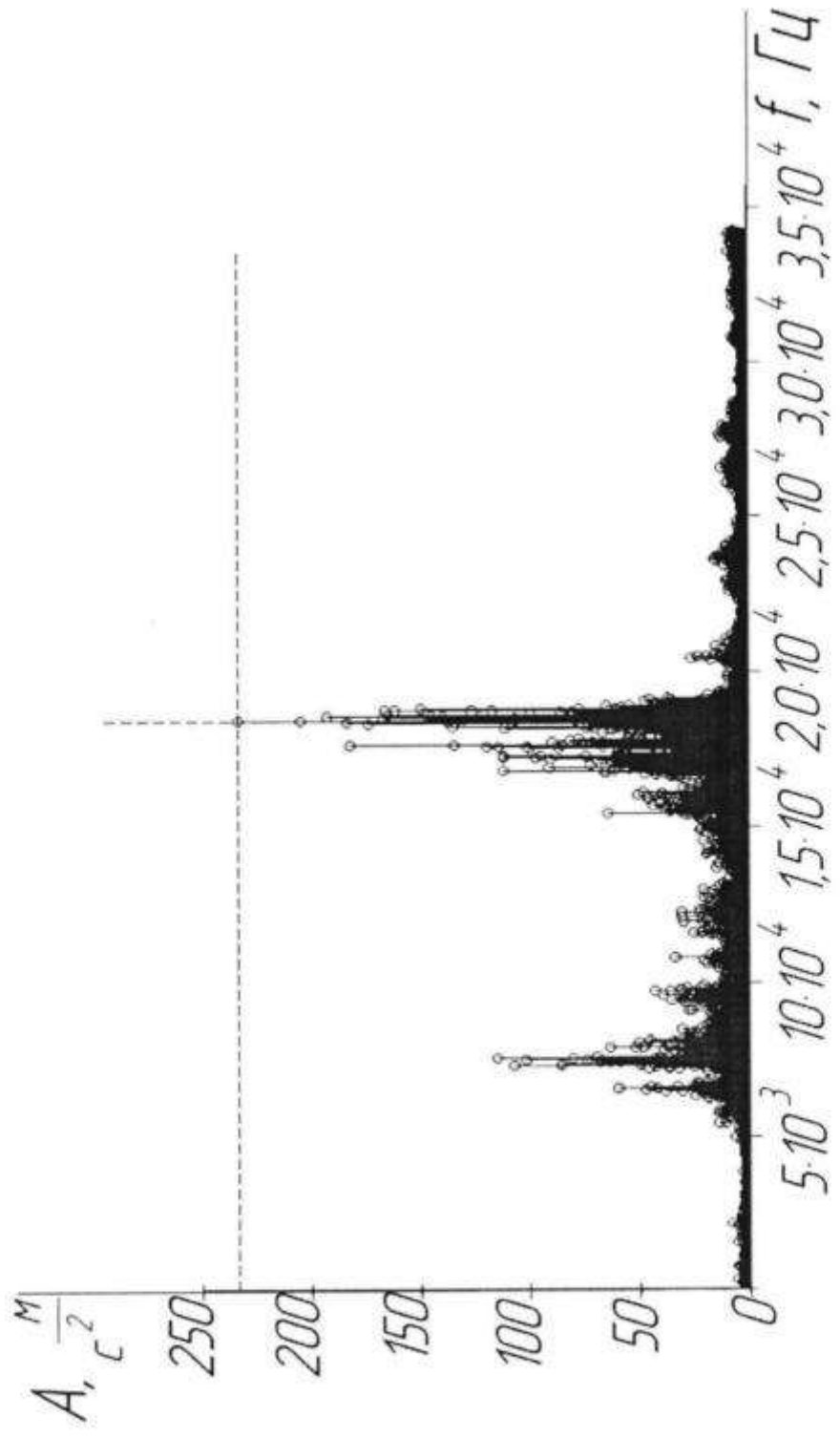
Фиг.3



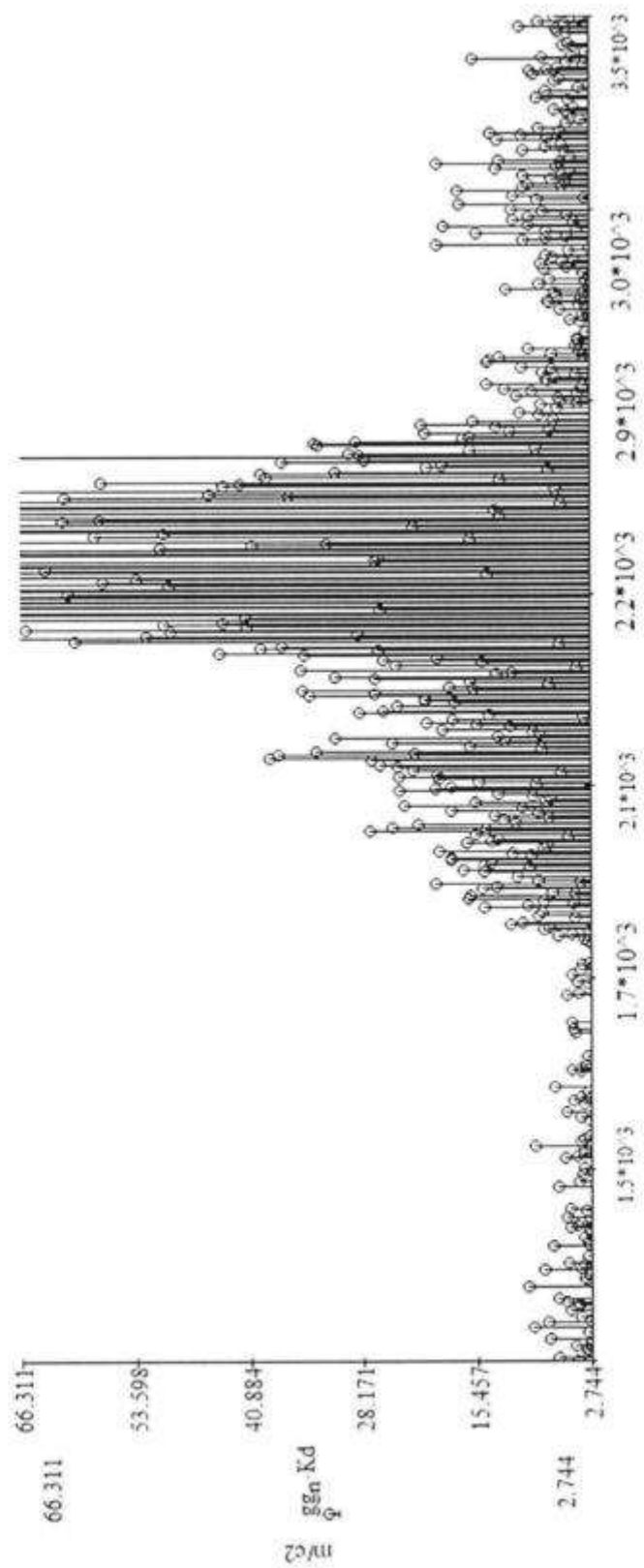
Фиг.4



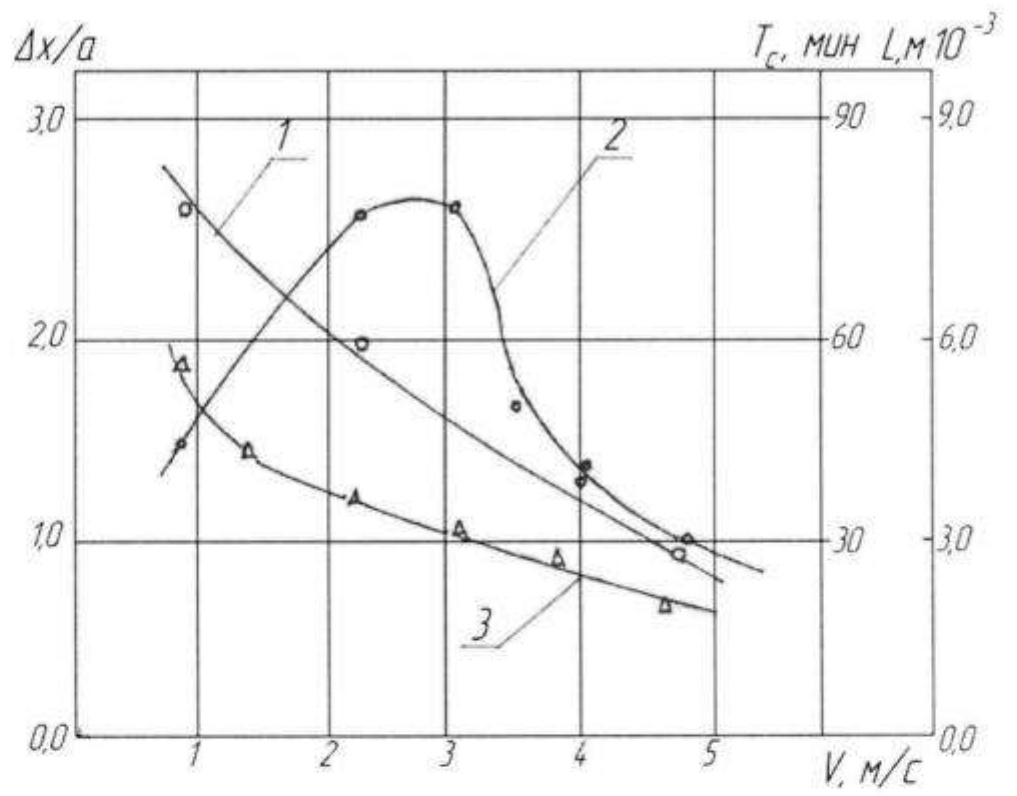
Фиг. 5а



Фиг. 56



Фиг. 5в



Фиг. 6