

УДК 671.152+621.93.026.23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА РАСПИЛОВОЧНОЙ СЕКЦИИ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук, доц. ДРОЗДОВ А. В.,
магистрант ЯМНАЯ Д. А.*

Белорусский национальный технический университет

В технологическом процессе переработки монокристаллов алмаза в бриллианты и другие изделия первой является операция их распиливания на отдельные части (полуфабрикаты), что продиктовано требованием рационального использования дорогостоящего сырья [1]. Распиливание выполняется на станке модели ШП-2, оснащенный десятью одинаковыми распиловочными секциями с индивидуальными приводами вращения инструмента – распиловочного диска. К основным недостаткам традиционного метода механического распиливания монокристаллов алмаза относятся весьма низкая производительность выполнения операции и низкое качество поверхности площадок распиленных полуфабрикатов. Для устранения на них следов обработки в виде однонаправленных рисков требуется выполнение последующей операции шлифования этих поверхностей, что приводит к увеличению процента безвозвратных потерь алмазного сырья.

С целью интенсификации процесса распиливания монокристаллов алмаза с одновременным повышением качества поверхности площадок распиленных полуфабрикатов авторы [2] предложили дополнительно сообщать заготовке двухмерное периодическое циркуляционное движение, совершаемое в плоскости распиливания. Для этого была проведена модернизация промышленной распиловочной секции, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

На станине 1 установлены передняя 2 и задняя 3 пары стоек. В передней паре стоек 2 вра-

щается распиловочный диск 4. Кристалл 5 закрепляется на стреле 6, установленной в задней паре стоек 3, которые связаны со станиной с помощью пары плоских пружин 7, образующих параллелограммный подвес, допускающий перемещение стоек 3 вдоль горизонтали. Стрела поддерживается в рабочем положении опорным (регулирующим) винтом 8, опирающимся на упругую прокладку 9. Перемещение стоек 3 обеспечивается кулачком 10, закрепленным на выходном валу привода (на чертеже не показан). Для создания рабочего давления на кристалл 5 на стреле 6 с помощью качающегося рычага 11 установлен регулируемый противовес 12.

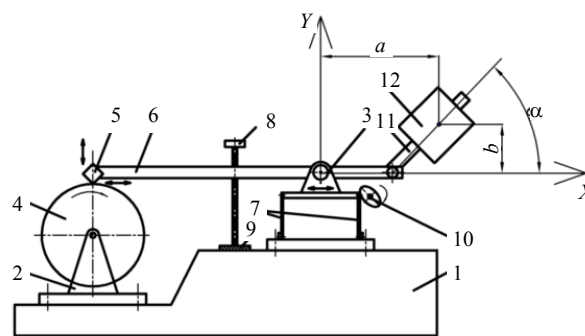


Рис. 1. Схема распиловочной секции, обеспечивающей периодическое циркуляционное движение заготовки

Наличие двухмерного периодического циркуляционного движения заготовки приводит к изменению кинематики и динамики ее взаимодействия с распиловочным диском. В частности, изменяются характер и величина усилия

прижатия (нагружения) заготовки к торцевой (режущей) поверхности распиловочного диска. Причем этот параметр в процессе распиливания оказывает доминирующее влияние на интенсивность разрушения материала заготовки, а соответственно и на производительность выполнения операции.

В этой связи цель проводимых авторами исследований заключалась в экспериментальном определении величины усилия, с которым опорный винт стрелы воздействует на упругую прокладку, в зависимости от условий и режима возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции. Наличие этих данных позволяет установить характер и особенности силового нагружения заготовки в процессе распиливания при сообщении ей двухмерного периодического движения, изменяющего кинематику и динамику ее контактного взаимодействия с распиловочным диском.

Методика проведения экспериментальных исследований. Для измерения усилия, действующего на упругую прокладку со стороны опорного винта стрелы, был изготовлен специальный тензометрический динамометр (рис. 2), состоящий из упругой (сталь 65Г) балки равного сопротивления 1, закрепленной по концам в корпусе 2, с наклеенными на ней тензодатчиками 3.

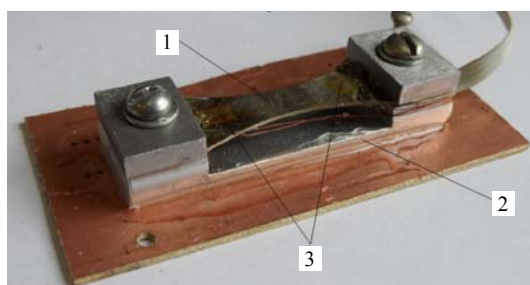


Рис. 2. Общий вид тензометрического динамометра, примененного в исследованиях

На распиловочной секции динамометр устанавливали на месте резиновой прокладки (рис. 1) и его упругая балка воспринимала усилие, действующее со стороны опорного винта стрелы и характеризующее условия силового нагружения заготовки в процессе распиливания. Сигнал от тензодатчиков, включенных по мостовой схеме, поступал на тензометрический усилитель и далее на цифровой вольтметр В7-БЗ, а также на двухкоординатный самопи-

сец ЭНДИМ 622.01, с помощью которого осуществляли регистрацию измеряемого параметра на бумажном носителе.

С целью установления количественной зависимости между усилием, действующим на динамометр со стороны опорного винта стрелы, и величиной выходного сигнала тензометрического усилителя проводили тарировку измерительной системы. Ее осуществляли путем нагружения упругой балки динамометра различными усилиями, создаваемыми аттестованными грузами, с фиксированием соответствующей величины выходного напряжения тензометрического усилителя. Тарировку проводили как с последовательным увеличением массы аттестованных грузов (прямой ход), так и с ее уменьшением (обратный ход). За окончательную характеристику динамометра принимали среднее арифметическое значение показаний цифрового вольтметра при прямом и обратном ходе. С помощью полученной тарировочной зависимости определяли величину статического усилия прижатия заготовки к распиловочному диску, соответствующего обычным условиям выполнения операции, а также расшифровывали зарегистрированные осциллограммы изменения этого параметра при сообщении заготовке двухмерного периодического циркуляционного движения.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение. Анализируя результаты исследований, необходимо отметить следующее принципиальное положение, касающееся условий реализации силового нагружения балки (упругого элемента) при распиливании в обычных условиях и с колебаниями. Так, в первом случае регулирование статического усилия нагружения балки со стороны опорного винта стрелы обеспечивается изменением величины плеча действия силы тяжести противовеса относительно оси ее качения (величина a , рис. 1) за счет изменения условного положения рычага с противовесом относительно горизонтальной оси (угол α , рис. 1), которая соответствует условию равновесия стрелы. В этом случае изменение положения центра тяжести противовеса относительно вертикальной оси (величина b , рис. 1) не оказывает влияния на условия силового нагружения балки. По мере увеличения угла α величина a

уменьшается, вызывая снижение уравновешивающего момента, действующего на стрелу со стороны противовеса, обуславливая тем самым увеличение статического нагружения балки со стороны опорного винта, закрепленного на другом конце неуравновешенной стрелы.

При сообщении оси качения стрелы вынужденных колебаний, направленных вдоль горизонтальной оси, величина параметра a существенным образом влияет на условия нагружения балки, что обусловлено действием переменного динамического момента, вызывающего поворот стрелы относительно оси ее качения.

С увеличением параметра a , т. е. уменьшением угла α , значение динамического момента возрастает, вызывая более интенсивное нагружение балки, и одновременно за счет уменьшения параметра a повышается уровень ее статического нагружения. Именно наличие такой зависимости между величиной статического нагружения балки, определяемой углом установки рычага стрелы с противовесом, и соответствующим ему значением динамического момента, действующего на стрелу, является принципиальной особенностью функционирования колебательной системы модернизированной распиловочной секции, оказывающей влияние на закономерности силового нагружения балки со стороны опорного винта стрелы.

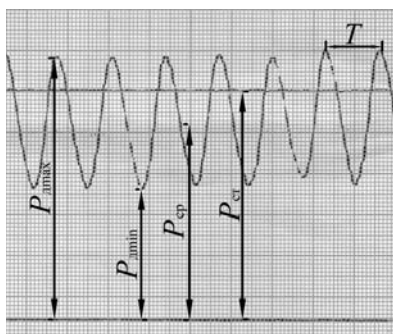


Рис. 3. Осциллограмма изменения усилия, действующего на упругую балку со стороны опорного винта стрелы

На рис. 3 представлена типичная осциллограмма изменения усилия, действующего на упругую балку со стороны опорного винта стрелы, при возбуждении колебательной системы распиловочной секции (амплитуда вынужденных колебаний $A_0 = 3$ мм; их частота $f_b = 2,8$ Гц; траектория движения заготовки –

эллиптическая). На рис. 3 приняты обозначения следующих параметров: $P_{ст}$ – статическое усилие, действующее на балку со стороны опорного винта стрелы при обычных условиях выполнения операции; P_{dmax} и P_{dmin} – соответственно максимальное и минимальное значения этого усилия при сообщении заготовке эллиптического циркуляционного движения; T – период циркуляционного изменения усилия, действующего на балку со стороны опорного винта стрелы.

В ходе проведения экспериментов были получены осциллограммы изменения этих параметров при различных условиях возбуждения колебательной системы, в частности при разных частоте вынужденных колебаний f_b и значении статического усилия нагружения балки, что обеспечивалось изменением углового положения рычага с противовесом относительно вертикальной оси, проходящей через узел качения стрелы (угол α , рис. 1). В результате обработки осциллограмм были получены экспериментальные зависимости, отражающие влияние условий возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции на величину и характер изменения усилия, действующего на упругую балку со стороны опорного винта стрелы.

На основании анализа результатов выполненных исследований установлено, что для принятых условий проводимых экспериментов величина усилия P_d изменяется во времени относительно его среднего значения P_{cp} по закону, близкому к гармоническому. При этом частота вынужденных колебаний усилия $f = 1/T$ практически совпадает с частотой вынужденных колебаний f_b , что имеет место в случае, когда собственная частота колебаний системы превышает величину f_b . Исходя из отмеченных положений, уравнение, описывающее закон изменения усилия, действующего на балку со стороны опорного винта стрелы, представим в виде

$$P_d = P_{cp} + P_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (1)$$

где $P_{cp} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2}$ – среднее значение усилия

за период колебаний T ; $P_0 = \frac{P_{max} - P_{min}}{2}$ – амплитуда колебаний усилия.

Влияние частоты вынужденных колебаний f_b и величины статической нагрузки $P_{ст}$ на зависимость $P_d(t)$ отражают данные, представленные на рис. 4.

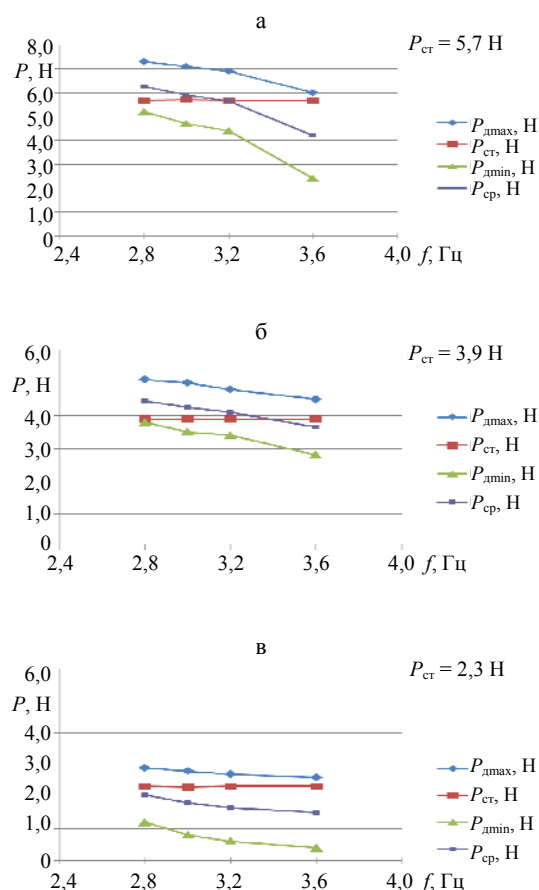


Рис. 4. Зависимости параметров силового нагружения балки (P_{dmax} , $P_{дmin}$, P_{cp} , $P_{ст}$) от частоты вынужденных колебаний f_b при различных значениях статического усилия ее нагружения $P_{ст}$, Н: а – 5,7; б – 3,9; в – 2,3

Из анализа графиков (рис. 4) следует, что влияние частоты возбуждения колебательной системы заключается в том, что по мере ее увеличения, начиная с $f_b = 2,8$ ГГц, максимальное P_{dmax} и минимальное $P_{дmin}$ значения усилия P_d , действующего на балку со стороны опорного винта, снижаются, обуславливая уменьшение его среднего за период колебаний значения P_{cp} . В наибольшей степени эта зако-

номерность проявляется при максимальной статической нагрузке ($P_{ст} = 5,7$ Н) и с повышением частоты вынужденных колебаний в диапазоне от 3,2 до 3,6 ГГц. По мере уменьшения $P_{ст}$ влияние частоты вынужденных колебаний на выявленную закономерность падает, а минимальному значению $P_{ст} = 2,3$ Н соответствует незначительное и практически линейное снижение значений P_{dmax} , $P_{дmin}$ и P_{cp} во всем диапазоне величин f_b .

Важно также отметить, что с изменением частоты вынужденных колебаний и статической нагрузки изменяется величина амплитуды колебаний усилия, действующего на балку со стороны опорного винта стрелы. Связано это с тем, что по мере увеличения f_b снижение параметра $P_{дmin}$ происходит более интенсивно, чем P_{dmax} , в результате чего амплитуда колебаний усилия P_0 возрастает при одновременном уменьшении P_{cp} . Наиболее существенно эта закономерность проявляется при максимальном значении $P_{ст} = 5,7$ Н с увеличением частоты вынужденных колебаний в диапазоне от 3,0 до 3,6 ГГц. С уменьшением величины $P_{ст}$ влияние f_b на изменение амплитуды колебаний P_0 уменьшается.

С учетом полученных данных представим зависимость (1) в виде

$$P_d = P_{cp} \left(1 + \frac{P_0}{P_{cp}} \sin \frac{2\pi}{T} t \right). \quad (2)$$

Отношение P_0/P_{cp} представляет собой безразмерный коэффициент K_A , характеризующий уровень динамического нагружения балки по амплитуде. Отношение $P_{ст}/P_{cp}$ можно рассматривать как безразмерный коэффициент K_{cm} , характеризующий смещение положения среднего усилия, действующего на балку за период колебаний, относительно статического усилия ее нагружения.

Используя эти коэффициенты, представим уравнение (2) в следующем виде:

$$P_d = \frac{P_{ст}}{K_{cm}} \left(1 + K_A \sin \frac{2\pi}{T} t \right). \quad (3)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные значения коэффициентов K_A и K_{cm} , соответствующие различным условиям возбуждения колебатель-

ной системы модернизированной распиловочной секции.

Следует отметить, что с увеличением частоты вынужденных колебаний значения коэффициентов K_A и K_{cm} возрастают, и наиболее интенсивно с повышением f_b в диапазоне от 3,2 до 3,6 Гц. Увеличение статической нагрузки, действующей на балку со стороны опорного винта стрелы, наоборот, приводит к снижению значений коэффициентов K_A и K_{cm} .

Таблица 1

Значения коэффициентов K_A и K_{cm} при различной частоте вынужденных колебаний и величине статического нагружения балки

Величина статического нагружения балки $P_{\text{ст}}$, Н	Частота вынужденных колебаний $f_{\text{в}}$, Гц							
	2,8		3,0		3,2		3,6	
	Значения коэффициентов K_A и $K_{\text{см}}$							
	K_A	$K_{\text{см}}$	K_A	$K_{\text{см}}$	K_A	$K_{\text{см}}$	K_A	$K_{\text{см}}$
2,3	0,90	1,20	1,00	1,30	1,20	1,40	1,70	1,70
3,9	0,70	1,08	0,77	1,10	0,80	1,20	1,10	1,40
5,7	0,35	0,90	0,40	1,00	0,43	1,10	0,83	1,30

Следует отметить, что повышение частоты вынужденных колебаний сопровождается увеличением амплитуды изменения действующего на балку усилия при одновременном снижении его среднего за период колебаний значения. Это обусловлено нелинейным возрастанием динамического момента, действующего на стрелу. При фиксированной частоте возбуждения колебательной системы с повышением статической нагрузки на балку происходит снижение среднего за период колебаний действующего на нее усилия, что связано с увеличением предварительного натяга в колебательной системе.

Таким образом, используя численные значения коэффициентов K_A и K_{cm} , с помощью зависимости (3) можно рассчитать параметры силового нагружения балки (упругого элемента) со стороны опорного винта стрелы при различных условиях возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции.

ВЫВОДЫ

1. С использованием созданного тензометрического динамометра разработана методика проведения экспериментальных исследований, позволяющая определять (фиксировать) величину и характер изменения во времени усилия, действующего на упругую балку со стороны опорного винта стрелы, при различных услови-

ях возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции.

2. Установлено, что для принятых условий возбуждения колебательной системы распиловочной секции (амплитуда колебаний $A_0 = 3$ мм; их частота $f_b = 2,8-3,6$ Гц, статическое усилие нагружения упругой балки $P_{ст} = 2,3-5,7$ Н) усилие P_d , действующее на упругую балку со стороны опорного винта стрелы, изменяется во времени относительно среднего значения $P_{ср}$ практически по гармоническому закону с частотой, соответствующей частоте вынужденных колебаний.

3. Выявлено, что с повышением частоты вынужденных колебаний и величины статического нагружения балки амплитуда изменения усилия P_0 , действующего на нее со стороны опорного винта стрелы, нелинейно возрастает при одновременном нелинейном снижении его среднего значения за период колебаний значения $P_{ср}$, в результате чего оно становится ниже величины усилия, обусловленного статическим нагружением балки $P_{ст}$.

4. На основании анализа установленных особенностей влияния условий возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции на величину усилия, действующего на балку (упругий элемент) со стороны опорного винта стрелы, предложено для описания закона его изменения использовать значения безразмерных коэффициентов

$$K_A = \frac{P_0}{P_{ср}} \text{ и } K_{cm} = \frac{P_{ст}}{P_{ср}}, \text{ характеризующих соот-}$$

ветственно уровень динамической нагруженности балки по амплитуде и смещение среднего за период колебаний усилия относительно статического усилия ее нагружения.

5. С использованием численных значений коэффициентов K_A и K_{cm} получено выражение, позволяющее рассчитать величину усилия, действующего на балку со стороны опорного винта стрелы, в зависимости от частоты возбуждения колебательной системы модернизированной распиловочной секции и величины статического нагружения балки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов, В. И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В. И. Епифанов, А. Я. Лесина, Л. В. Зыков; под ред. В. И. Епифанова. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.

2. **Киселев, М. Г.** Повышение интенсивности и качества распиливания твердых и сверхтвердых материалов путем сообщения заготовке двухмерного циркуляционно-

го движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестник БНТУ. – 2011. – № 5. – С. 36–40.

Поступила 18.09.2012