

УДК 531.781.2 + 621.9.01

## ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ СТЕНД

*Д.А. Кацай*

В статье рассматривается универсальный тензометрический стенд для одновременного измерения трех взаимно ортогональных компонент сил, прикладываемых к измерительной платформе. Стенд может использоваться для измерения сил резания, с которыми происходит обработка материалов малогабаритными мобильными фрезерными агрегатами в условиях, соответствующих реальному режиму их эксплуатации. Приведены уравнения измерений внешних сил, прикладываемых к платформе стенда. Представлена структурная схема подключения тензометрических датчиков.

Ключевые слова: измерительный стенд; силы резания.

Стенд предназначен для одновременного трехкомпонентного измерения усилий резания, возникающих при обработке материалов мобильными агрегатами. Один из вариантов реализации мобильного агрегата на базе стандартного снегоуборщика [1] защищен патентом на полезную модель [2]. Необходимость разработки стенда для мобильного фрезерного агрегата обусловлена сложным процессом взаимодействия режущего инструмента с материалом. Например, для ротационного инструмента, входящего в состав вышеуказанного фрезерного агрегата, математическая модель процесса взаимодействия режущего инструмента с материалом представляет собой в общем случае систему стохастических импульсных нелинейных дифференциальных уравнений. В статье [1] представлен частный случай взаимодействия инструмента с материалом по одной компоненте силы резания, совпадающей с направлением подачи инструмента. Обработка материала ротационным инструментом, перемещаемым вручную, сопровождается неравномерностью его подачи и прикладываемого усилия, неоднородностью обрабатываемого материала. В этой связи решение задачи о прочностном расчете требует проверки значений сил резания на измерительном стенде в условиях, соответствующих реальной эксплуатации фрезерного агрегата.

Известно устройство для трехкомпонентного измерения составляющих сил резания [3] режущие элементы в котором установлены на тензометрических датчиках. В предлагаемом устройстве стенда обрабатываемый материал, с помощью платформы, устанавливается на тензометрических датчиках. Суммарные реакции в датчиках уравнивают воздействие режущих элементов. Предлагаемая конструкция является универсальной по отношению к применяемому инструменту.

Кинематическая схема 3-х компонентного тензометрического стенда (далее стенда) представлена на рис. 1. В состав стенда входят тензометрические датчики (далее датчики) 1–12 (показаны условно в виде упругих

элементов) и платформа 13, предназначенная для закрепления обрабатываемого материала. Предполагается, что платформа расположена в горизонтальной плоскости  $xu$ , а ось  $z$  направлена по вертикали места. Оси чувствительности датчиков 1 – 4 параллельны оси  $z$  и являются опорами для платформы, воспринимающими ее вес с обрабатываемым материалом. Оси чувствительности датчиков 5 – 8 параллельны оси  $y$ , а оси чувствительности датчиков 9 – 12 параллельны оси  $x$ .

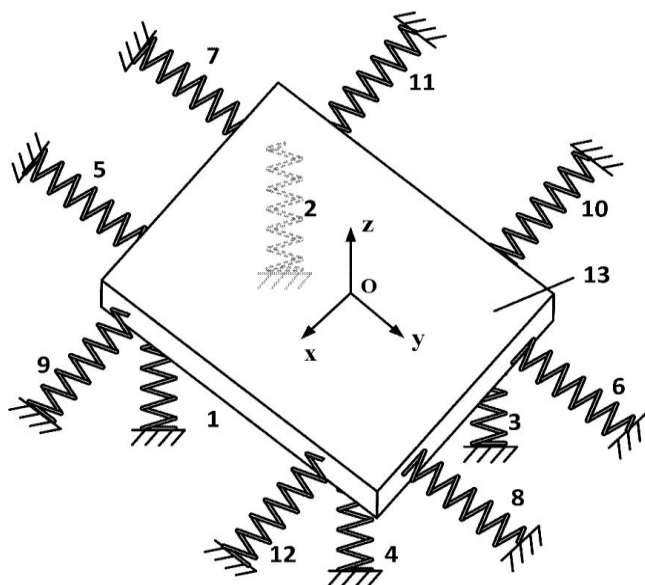


Рис. 1. Кинематическая схема 3-х компонентного стенда

На рис. 2а показана схема реакций в тензометрических датчиках, возникающих при воздействии на платформу внешней силы  $F$  и веса платформы с находящейся на ней материалом весом  $P$ .

Условия равновесия платформы в векторной форме имеют вид (1) и (2) для установившегося режима измерений:

$$\sum_{i=1}^{12} R_i = F + P, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{12} M_O(R_i) = M_O(F + P). \quad (2)$$

На рис. 2б показана схема реакций в тензометрическом стенде при развороте платформы на угол  $\alpha$ , обусловленный упругими деформациями датчиков. Максимальное значение угла  $\alpha$  при расстоянии между датчиками  $b=0,4$  метра и деформации датчика  $\Delta=0,4$  мм определяется выражением  $\alpha = \Delta/(2b)$  и составляет 0,002 радиана. Проекции реакций связей одних датчиков на перекрестные оси чувствительности других датчиков будут пропорциональны углам  $\alpha$  и представляют собой погрешности измерения усилий в рассматриваемой схеме стенда. Максимальные значения погрешностей измерений соответствуют максимальному значению  $\alpha$  и составляют 0,2 %. Такой точности измерений достаточно для оценки сил резания, воз-

никающих при поверхностной обработке дорожных покрытий. Все реакции  $R_i$ , ( $i=1, \dots, 12$ ) сохраняют свои направления относительно координатных осей  $x, y$  и  $z$ , благодаря сферической форме кинематических пар в зоне контактов датчиков с платформой.

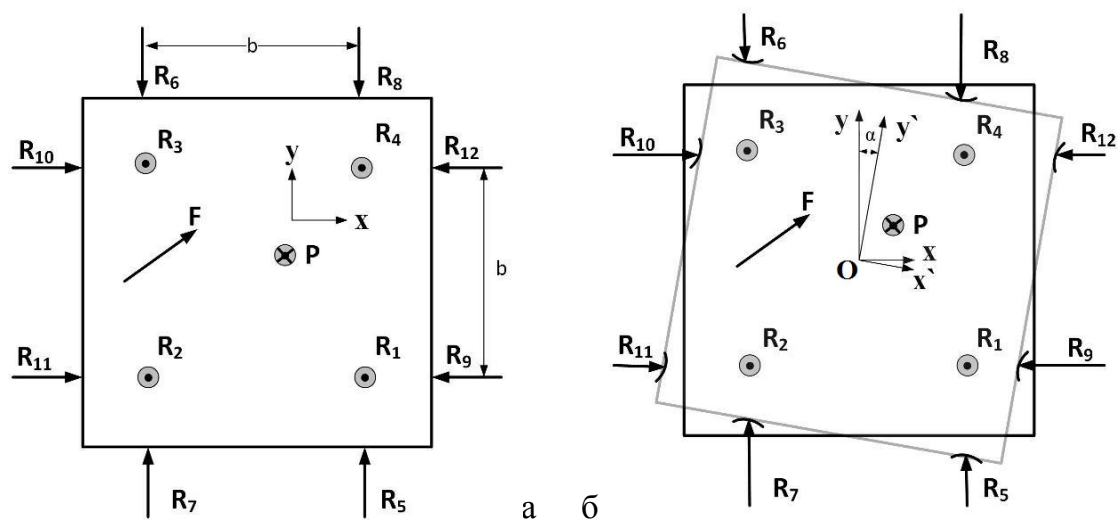


Рис. 2. Схема реакций в стенде

На рис. 3 показан вариант установки платформы 1 на тензометрические датчики 2 через сферические опорные элементы 3, причем тензометрические датчики также имеют сферические поверхности, но меньшего радиуса.

Тензометрические датчики имеют специфическую особенность применения, заключающуюся в создании в них предварительной нагрузки. Обусловлено это отклонением характеристики датчика от линейной вблизи нулевой нагрузки. В датчиках 1–4, показанных на рис. 1, предварительная нагрузка формируется благодаря суммарному весу платформы с обрабатываемым материалом. Датчики 5–12 должны устанавливаться по схеме для датчиков 4, показанных на рис. 3. С помощью упругих элементов 5 в датчиках 4 создаются предварительные натяжения, достаточные для измерения знакопеременных усилий. Предварительные натяжения по абсолютной величине должны быть больше измеряемых реакций, чтобы в процессе измерений не произошло обнуление суммарной реакции в датчике. С другой стороны, максимальное измеряемое датчиком усилие не должно превышать допустимое значение для максимального паспортного значения датчика. Предлагаемая конструкция опорных узлов датчиков обеспечивает относительные угловые движения элементов кинематических пар без проскальзывания. Следовательно, относительные движения элементов подвесов датчиков сопровождаются трением качения, которое существенно

меньше трения скольжения. Силы и моменты трения в подвесе датчиков являются источниками измерительных погрешностей, и чем они меньше, тем точнее будут производиться измерения.

На рис. 4 показана схема установки фрезерного агрегата 1 на стенд 2: а) – вид спереди; б) – вид сбоку. На виде сбоку показан аналоговый ультразвуковой датчик расстояний УЗД. Выходной сигнал УЗД пропорционален расстоянию  $x$  до щитка 3, находящегося на корпусе агрегата. Наличие информации о мгновенном положении агрегата относительно стенда позволяет путем прямой оценки его перемещения за единицу времени оценить величину и скорость подачи режущего инструмента относительно обрабатываемого материала.

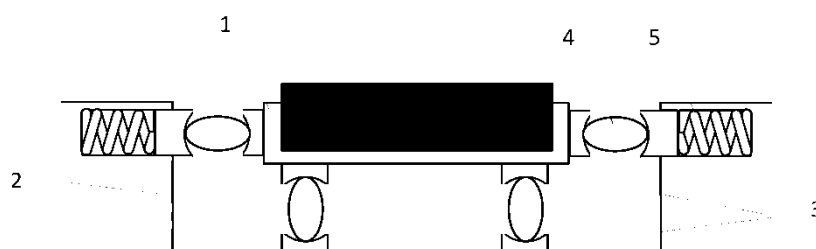


Рис. 3. Схема установки платформы на тензометрические датчики

На рис. 5 представлена структурная схема измерительной части стенда для измерения усилий. Чувствительные элементы стенда – 12 тензометрических датчиков – собраны в группы по 4 датчика. Датчики ТД<sub>1</sub>,...,ТД<sub>4</sub> подключены к усилителю  $У_1$ . Они образуют 4-точечную схему измерения вертикального усилия резания. Датчики ТД<sub>5</sub>,...,ТД<sub>8</sub> подключены к усилителю  $У_2$ . Они образуют 4-точечную схему измерения продольного усилия резания. Датчики ТД<sub>9</sub>,...,ТД<sub>12</sub> подключены к усилителю  $У_3$ . Они образуют 4-точечную схему измерения поперечного усилия резания.

Усиленные сигналы датчиков подаются на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), подключенного к компьютеру, например, через порт USB. В компьютере данные обрабатываются и выводятся на экран монитора в виде графиков и таблиц, содержащих значения сил резания.

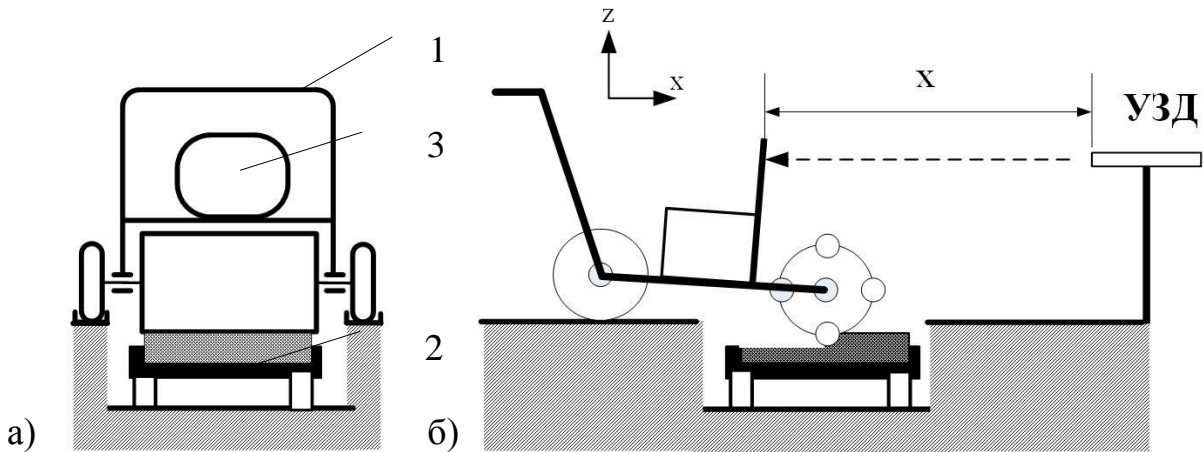


Рис. 4. Схема установки фрезерного агрегата на стенд:  
а – вид спереди; б – вид сбоку

Уравнения измерений получаются из уравнения (1) путем проектирования векторов на соответствующие координатные оси системы координат  $Oxyz$ :

$$\sum_{i=1}^4 R_{iz} = F_z + P, \quad (3)$$

$$\sum_{i=5}^8 R_{iy} = F_y + 4 \cdot F_0, \quad (4)$$

$$\sum_{i=9}^{12} R_{ix} = F_x + 4 \cdot F_0. \quad (5)$$

где в уравнения (4) и (5) вместо нулевых проекций силы тяжести  $P$  подставлены значения предварительной нагрузки датчиков от упругих элементов  $F_0$  – силы, создаваемой упругими элементами 5, показанными на рис. 3. В уравнениях (3)–(5) имеются нулевые проекции реакций, обусловленные расположением основания стенда в плоскости горизонта, а также сферической формой опор:

$$R_{ix} = 0, R_{iy} = 0, \text{ для } i = 1, \dots, 4;$$

$$R_{ix} = 0, R_{iz} = 0, \text{ для } i = 5, \dots, 8;$$

$$R_{iy} = 0, R_{iz} = 0, \text{ для } i = 9, \dots, 12.$$

Из уравнений (3)–(5) находим выражение для составляющих силы резания по схеме, показанной на рис. 5:

$$F_z = \sum_{i=1}^4 R_{iz} - P, \quad (6)$$

$$F_y = \sum_{i=5}^8 R_{iy} - 4 \cdot F_0, \quad (7)$$

$$F_x = \sum_{i=9}^{12} R_{ix} - 4 \cdot F_0. \quad (8)$$

Уравнения (6)–(8) справедливы для случая, когда платформа стенда выставлена в плоскости горизонта.

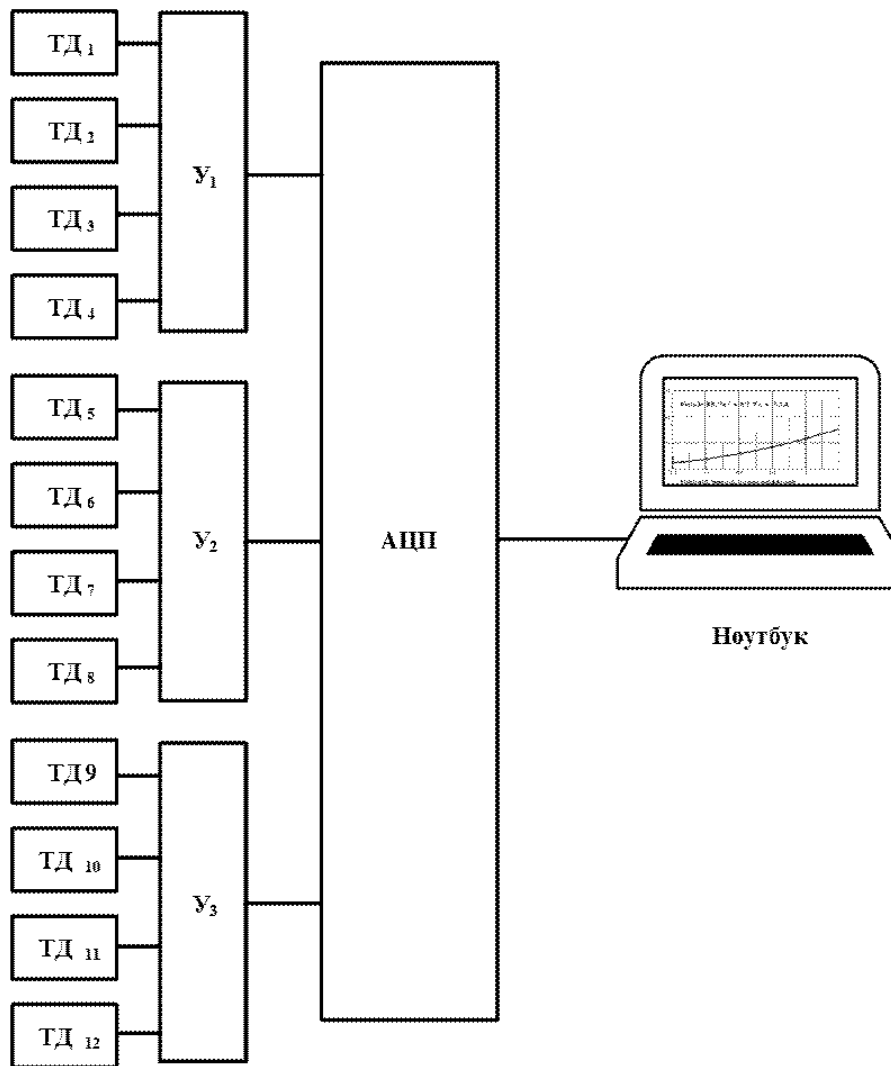


Рис. 5. Структурная схема электрической части стенда

По кинематической схеме стенда, представленной на рис. 1, разработана конструкция стенда. На рис. 6а показана измерительная платформа 1 с опорными узлами 2 для тензометрических датчиков ТД<sub>1</sub>,..., ТД<sub>12</sub>. Платформа предназначена для закрепления на ней испытуемого образца. Она выполнена из стального листа толщиной 10 мм с целью обеспечения необходимой жесткости и прочности. Обрабатываемый материал закрепляется на платформе 1 с помощью подвижной перегородки, приводимой в движение двумя винтовыми механизмами 3. Опорные узлы 2 платформы выполнены в форме подпятников со сферическими гнездами, в которые устанавливаются сферические цапфы датчиков. Кинематическая схема установки датчиков на сферические опоры показана на рис. 3.

На рис. 6б показано основание стенда, выполненное из стального швеллера № 12. Жесткостные свойства швеллера обеспечивают стабильность и точность измерения усилий резания в условиях ударных нагрузок, возникающих во время резания материала ротационным способом. Удары

возникают в момент захода режущего лезвия ротационного инструмента на материал с большой подачей. На основании станда установлены тензометрические датчики 4 и усилители 5.

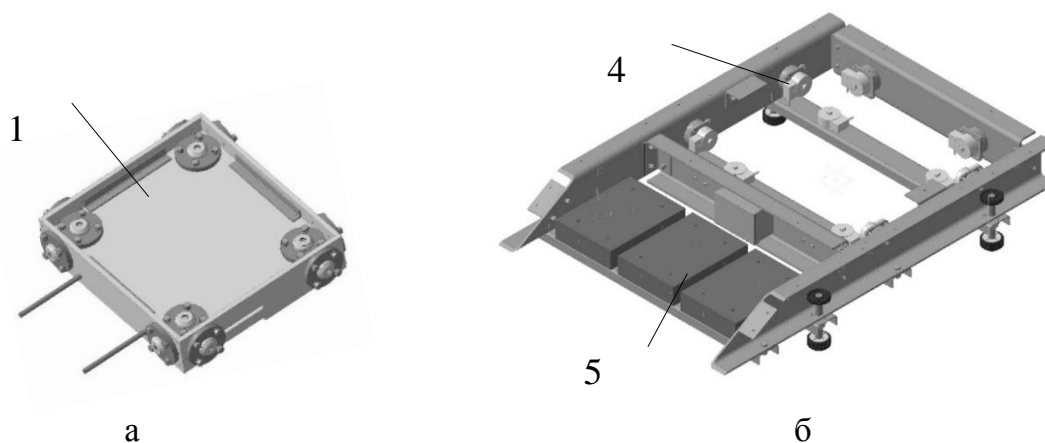


Рис. 6. Стенд в сборе с датчиками: а – измерительная платформа с опорными узлами для датчиков (вид снизу); б – основание станда

Программное обеспечение позволяет анализировать силы резания как в процессе эксперимента, так и после него, по значениям, сохраняемым в файлах данных. Результаты измерений можно использовать при дальнейшей разработке агрегатов ротационного резания материалов, применяемых, например, в качестве навесных устройств для дорожных строительных машин. Измерительный стенд может использоваться для обучения начинающих операторов рациональным приемам работы с агрегатами для поверхностной обработки.

#### Библиографический список

1. Кацай, Д.А. Математическая модель автоматизированной системы управления мобильным агрегатом повышенной энергоэффективности / Д.А. Кацай // Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 35–39.
2. Патент на полезную модель № 96875, Российская Федерация, МПК Е 01Н 5/12. Устройство для разрушения ледяных и твердых образований на дорожных покрытиях / Д.А. Кацай, И.А. Баранова. – Заявка № 2010113856/21; заявл. 08.04.2010; опубл. 20.08.2010.
3. А.с. 453594 СССР, М.Кл. G 01 L 1/04. Трехкомпонентный динамометр / В.И. Локай, Д.В. Пологих, М.П. Набатян, А.А. Тютерева. – № 178968/18-10; заявл. 29.05.72; опубл. 15.12.74; Бюл. № 46.

[К содержанию](#)