

Годовой экономический эффект, согласно акту промышленного испытания, составил 157309 руб (Р).

Это свидетельствует о целесообразности реализации вибрационного и раздавливающе-сдвигового воздействия при измельчении клинкера и других материалов цементного производства в вибровалковом измельчителе-активаторе.

Заключение. Разработанное оборудование прошло промышленные испытания на УЧПП КБ «Промышленные технологии и комплексы». Изготовлены промышленные образцы вибровалкового измельчителя (КД ВВИА.613242.002 и КД ВВИА.613242.003) с размерами валков $D \times B = 0,3 \times 0,3$ ($Q = 2 \dots 4$ т / ч) на предприятии для производства клинкера «Х».

Опытно-практическое использование вибровалкового измельчителя при помоле клинкера позволило повысить производительность молотковой дробилки на 20,5 % и снизило удельный расход электроэнергии на 30,6 %. Продолжительность работы бил увеличилась на 15 %. При переработке строительных отходов производительность увеличилась на 40 %, удельный расход электроэнергии снизился на 18 %.

Список используемых источников

1. Лесовик, В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учётом генезиса горных пород / В. С. Лесовик. — М. : АСВ, 2006. — 525 с.
2. Белоусов, В.В. Основы геотектоники. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1989. — 382 с.
3. Сотник, Л. Л. К вопросу создания вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, Л. А. Сиваченко // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Могилев, 27–28 окт. 2016 г. / Белорус.-Рос. ун-т. — Могилев, 2016.
4. Вибровалковый измельчитель-активатор : пат. РФ № 186478 : В02С 4/32 / В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, М. В. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. Л. Сотник, П. Ю. Горягин. — № 2018130277 ; заявл. 20.08.2018 ; опубл. 22.01.2019.
5. Сотник, Л.Л. Интенсификация процесса дезинтеграции в вибровалковом измельчителе : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Л.Л. Сотник. — Минск, 2022.
6. Интенсификация технологических процессов в аппаратах адаптивного действия : коллектив. монография / Л. А. Сиваченко [и др.] ; под науч. ред. Л. А. Сиваченко ; М-во образования Респ. Беларусь, Баранович. гос. ун-т. — Барановичи : БарГУ, 2020.

УДК 621, УДК 531

Л. Л. Сотник, Е. С. Сидор, М. С. Потоцкий, К. В. Сорока

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА РАВНОВЕСИЯ СИСТЕМЫ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ 3D ПЕЧАТИ С УЧЕТОМ СИЛ ТРЕНИЯ

Введение. Аддитивные технологии (Additive Manufacturing) — технологии, предполагающие изготовление изделия по данным цифровой модели методом послойного добавления материала. Современные цифровые продукты позволяют разместить в одной среде все стадии производства продукта от идеи до изделия. Развитие CAD/CAM/CAE систем стимулировало развития технологий 3D-печати, но при этом немаловажной остаются задачи классической механики систем.

Несмотря на то, что аддитивные технологии охватывают новые сферы деятельности человека: дизайн, архитектура, археология при использовании 3D-принтера для реализации совершенно новых идей и проектов необходимо анализировать и учитывать его возможности и законы механики.

Основная часть. При печати различных конструкций с использованием нескольких экструдеров, различных по свойствам материалов, цветовой гаммы и тд., возникает ряд вопросов относящихся к курсу «Георетической механики».

Одной из наиболее часто встречающихся проблем 3D печати является смещение основной модели (рисунок 1).

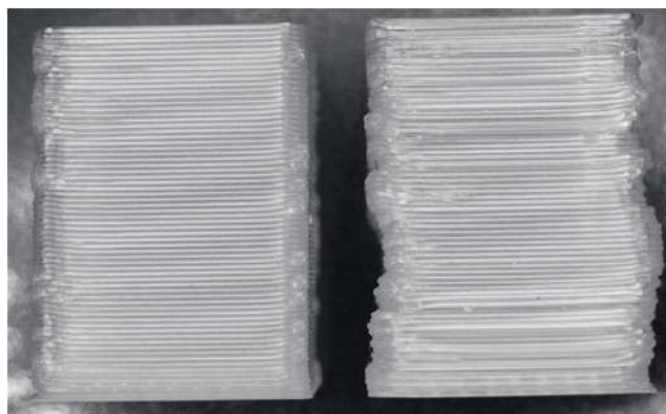


Рисунок 1 — Смещение слоев модели

Причина дефекта. В большинстве случаев смещение основы модели происходит из-за массы распечатки: нижние слои еще не успели остыть, когда как уже новые давят на первый слой, вызывая его смещение.

Устранение данного дефекта с точки зрения 3D печати не является сложной задачей, достаточно выполнить ряд условий [1]:

- распечатки должны успеть достаточно остыть, чтобы выдержать вес всей модели. При охлаждении важно действовать аккуратно, так как избыточное охлаждение может привести к деформации первого слоя. Стоит начать с понижения температуры платформы на 5 градусов от ее рекомендуемой температуры, но не больше, чем на 20 градусов;

- в большинстве случаев проблемы с 3D-печатью напрямую связаны с неправильно установленным уровнем платформы. Чтобы откалибровать платформу, необходимо обратиться к рекомендациям по калибровке от производителя 3D-принтера. Помимо этого, чтобы увидеть, был ли пластик уложен ровно, рекомендуем распечатать калибровочный куб и оценить качество подачи филамента;

- если немного приподнять сопло вручную, можно избежать смещения первого слоя;

- если закруглить углы модели, то уменьшится риск смещения первого слоя. Начать рекомендуется с 5 мм и 45 градусов скоса, после путем проб и ошибок можно добиться наилучшего результата;

- необходимо проверить натяжение ремней на осях;

- необходимо проверить работу линейных подшипников. Если каретка движется по оси в одну сторону легче, чем в другую, то необходимо заменить линейный подшипник.

Рассмотрим равновесие системы круглых цилиндров, например, ряда слоев материала (рисунок 2), полученного при печати с различными параметрами. Вопрос сбалансированности таких систем возникает при печати на холодном столе, различными феноменами, с задержкой во времени и т. д.

Постановка задачи и цели исследования. В статье объект исследования ограничен фрагментом сложной системы — совокупностью трех цилиндров на плоскости (рисунок 3) [2]. Предполагается, что нижние цилиндры одинаковы, то есть система имеет вертикальную плоскость симметрии. Все цилиндры и опорная плоскость шероховатые. Трение качения пренебрегаем — считаем, что гладкость тела обеспечивается трением скольжения.

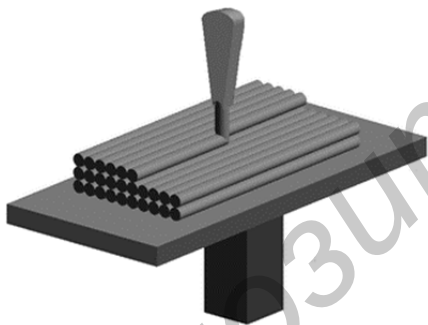


Рисунок 2 — Схема 3D печати

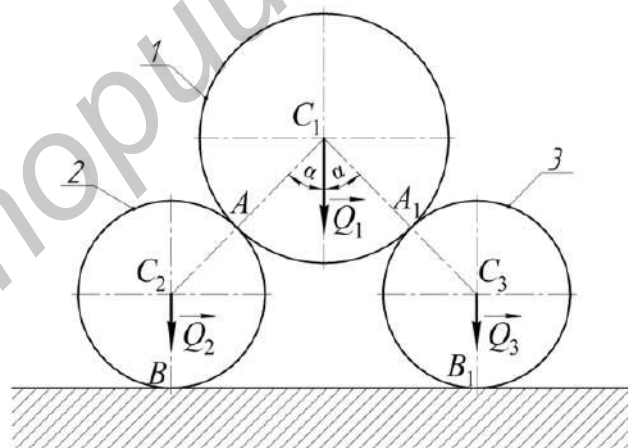


Рисунок 3 — Схема нагружения

Задача рассматривается в рамках курса «Теоретическая механика». Цель — научить методу применения абстрактных положений в курсе решения прикладных технических задач. Знакомство с исследованием будет способствовать углубленному изучению дисциплины студентами, накоплению опыта молодыми преподавателями, поможет специалистам в решении инженерных задач.

Качественный анализ равновесия системы. Уточнение задачи. Обозначим силы тяжести цилиндров 1, 2, 3 соответственно через Q_1 , $Q_2 = Q_3$, а коэффициент трения между цилиндрами через f . Определим максимальное расстояние, на которое цилиндры 2 и 3 можно отодвинуть от плоскости симметрии системы, чтобы не нарушилась ее равновесие. Эти расстояния определяются через углы α : $OB = OB_1 = (r_1 + r_2)\sin\alpha$ (рисунок 3). Следовательно, для получения ответа достаточно найти угол α . Будем считать, что силы трения на горизонтальной плоскости при любом положении цилиндров 2 и 3 удерживают их от скольжения по плоскости.

Анализ задачи, дает ответ на вопрос: почему при $f \neq 0$ значение угла α ограничено. На рисунке 3 показаны силы взаимодействия между цилиндрами 1 и 2. Обозначим силы, приложенные к цилиндру 1, через N_{12} и F_{12} , а $\vec{R}_{12} = \vec{N}_{12} + \vec{F}_{12}$. Противоположные им по направлению силы N_{21} и F_{21} , а $\vec{R}_{21} = \vec{N}_{21} + \vec{F}_{21}$, приложенной к цилиндру 2. Такие же силы возникают между цилиндрами 1 и 3 (на рисунке 4 не показаны). Силы N_{12} и N_{13}

вызывают нормальные реакции со стороны цилиндров 2 и 3, а силы N_{21} и N_{31} давление цилиндра 1 — на нижние цилиндры. Силы сцепления между двумя телами обозначаются F_{12} , F_{13} и F_{21} , F_{31} . Для идеально гладких поверхностей они равны нулю. В последнем случае из условия равновесия цилиндра 1 определяем нормальные силы:

$$N_{12} = N_{21} = N_{13} = N_{31} = \frac{Q_1}{2 \cos \alpha}. \quad (1)$$

Проанализируем возможное воздействие силы P на цилиндр (рисунок 5).

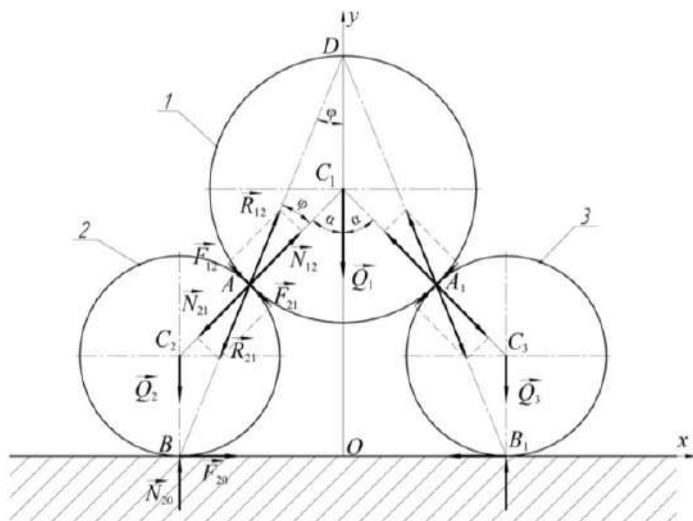


Рисунок 4 — Схема равновесия системы

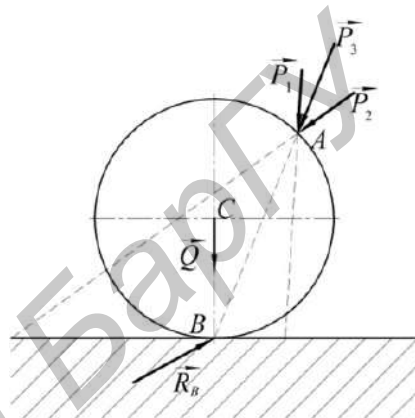


Рисунок 5 — Схема нагружения системы силой P

Обратим внимание на следующие обстоятельства:

1. Известно, что если линия действия силы P_1 , приложенной к цилиндру (рисунок 5), проходит правее точки B , то сила стремится повернуть ее по часовой стрелке, когда она пересекает плоскость отсчета левее точки B (как при силе P_2), то — против движения стрелки. И только сила P_3 , линия действия которой проходит через точку B , не вызывает вращения цилиндра, он может скользить по плоскости самостоятельно или оставаться в равновесии при определенном значении коэффициента трения f_H .

2. Из формулы (1) следует, что с увеличением угла α давление цилиндра 1 на цилиндры 2 и 3 увеличивается. Если цилиндры не гладкие, одновременно увеличивается и сила сцепления.

3. Давление цилиндра 1 на цилиндры 2 и 3, как видно из рисунка 4, стремится сместить их от оси Oy , а силы связи F_{21} и F_{31} удерживают их от такого смещения, поскольку они направлены к точкам симметрии. Последнее возможно, если цилиндры 2 и 3 находятся на шероховатой плоскости.

Возвращаемся к указанной ранее задаче. Увеличим угол α от его минимального значения. Для этого цилиндры 2 и 3 будут одинаково удалять от точки симметрии, цилиндр 1 будет опускаться. Равнодействующая реакции R_{21} и R_{31} при этом усиливаются и проходят в любом новом равновесном положении системы через точки контакта B и B_1 . При определенном значении угла α , которое будет наибольшим, сила сцепления $F_{12} = F_{21}$ достигнет своего предельного значения ($F_{12} = F_{21} = fN_{12} = fN_{21}$) которое называется силой трения (в его обозначении используется индекс «т»: $F_{1т} = F_{2т}$). При дальнейшем увеличении угла α давление на цилиндры 2 и 3 увеличится, а удерживающие силы трения останутся неизменными. Равновесие такой системы нарушается. Если теперь построить реакцию $\vec{R}_{21} = \vec{N}_{2т} + \vec{F}_{2т}$, то мы увидим, что линия ее действия проходит уже не через точку B , а над ней. Таким образом, ответ на второй вопрос следующий: *наибольшее значение угла α определяется значением коэффициента трения*. При $f = 0$ равновесие цилиндров невозможно.

Определение максимального угла α . Далее будем считать, что угол α (рисунок 4) достигает наибольшего значения, а сила $F_{12} = F_{1т}$. Тогда угол f между нормалью AC_1 к поверхности цилиндра 1 и вектором \vec{R}_{12} будет углом трения, для которого $\operatorname{tg} f = f$. Выразим угол α через коэффициент трения f .

В состоянии граничного равновесия общая линия действия реакций \vec{R}_{12} и \vec{R}_{31} проходит через точки B и D . Отмечаем угол φ в вершине D . Находим сумму углов в треугольнике ADC_1 , используя формулу

$$2\varphi + (180^\circ - \alpha) = 180^\circ$$

Следовательно, $\varphi = \alpha / 2$, $\operatorname{arctg} f = \alpha / 2$, $\alpha = 2 \operatorname{arctg} f$.

Определение минимального коэффициента трения f_B . Как отмечалось выше, цилиндры 2 и 3 могут оставаться в равновесии под действием сил \vec{R}_{21} и \vec{R}_{31} только на шероховатой поверхности. В положении предельного равновесия сила трения $F_{20} = f_0 N_{20}$, откуда $f_0 = F_{20} / N_{20}$. Сила $F_{20} = f N_{12}$ была найдена ранее. Для определения N_{12} и N_{20} установим условия равновесия цилиндра 1 и всей системы цилиндров соответственно:

$$\Sigma F_{y1} = 2N_{12} \cos \alpha + 2F_{12} \sin \alpha - Q_1 = 0, \quad (2)$$

$$\Sigma F_y = 2N_{20} - Q_1 - 2Q_2 = 0, \quad (3)$$

Из уравнения (2), учитывая зависимость $F_{12} = f N_{12}$, находим реакцию $N_{12} = Q_1 / 2(\cos \alpha + f \sin \alpha)$ и $F_{20} = f Q_1 / 2(\cos \alpha + f \sin \alpha)$. Из уравнения (3) получаем $N_{20} = (Q_1 + 2Q_2) / 2$.

Теперь найдите наименьшее значение коэффициента трения f_B цилиндров 2 и 3 с плоскостью, необходимые для расчета системы, по формуле $f_B = f Q_1 / (Q_1 + 2Q_2)e$, где $e = \cos \alpha + f \sin \alpha = 1$. Для определения коэффициента e используем формулы:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = f, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 - \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad \sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}, \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}.$$

Заключение. Как и в любом производстве, 3D-печать не всегда проходит гладко. Ошибки печати не ограничиваются теми, что представлены в этой статье. Законы теоретической механики описывают проблемы не только классического машиностроения, но более современных производств.

Представленный анализ и методика помогут избежать ошибок во время 3D печати изделий путем изменения толщины слоя и расстояния между материалом во время печати.

Список цитируемых источников

1. Частые проблемы при печати [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ask.bc-pf.org/t/chastye-problemy-pri-reschati/7423> Частые проблемы при печати. — Дата доступа: 05.05.2024.
2. Русан, С. И. Раўнавага сістэмы цыліндрычных цел з улікам трэння слізгання / С.И. Русан, Л.Л. Сотник // Наука и технологии: инновации и качество: Материалы междунар. науч.-практ. конференции, г. Барановичи, 24—25 ноября 2011 г. — Барановичи : РИО БарГУ, 2011. — С. 47—51.