УДК 666.97
МРНТИ 55.41.13

https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-4-234-244

[1]*Сариев Б.,
PhD, ассистент-профессор, ORCID ID: 0000-0002-2637-9704,
*e-mail: b.sariyev@astanait.edu.kz
[2]Амрин А.,
PhD, постдокторант, ORCID ID: 0000-0001-7567-6695,
e-mail: andas.amrin@nu.edu.kz
[3]*Джексембаева А.,
PhD, ORCID ID: 0009-0009-6153-9580,
*e-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru
[3]Конканов М.,
PhD, ORCID ID: 0009-0006-9365-4127,
e-mail: marcon@metrology.kz

[1]Astana IT University, г. Астана, Казахстан
[2]Назарбаев Университет, г. Астана, Казахстан,
[3]Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

АНАЛИЗ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГЕОПОЛИМЕРА ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ АРМИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНОВЫМ ВОЛОКНОМ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация

Лидирующее место в достижениях в области строительства занимает 3D-печать, которая позволяет создавать прочные и сложные конструкции, минимизируя потери ресурсов. В качестве жизнеспособной замены обычным цементным материалам выделяют экологические преимущества и высокие механические характеристики геополимеров на основе летучей золы. Это исследование изучает, как добавление полиэтиленовых (PE) волокон изменяет эти свойства и как различные концентрации влияют на поведение текучести и способность производства композитного материала. Анализ неньютоновского поведения в этих материалах проводится с использованием модели Гершеля-Балкли. Точно измеряя критические реологические факторы, такие как вязкость и поведение потока, это исследование оценивает, как эти факторы влияют на процессы 3D-печати. Оптимальное сочетание содержания волокон выявляется в контролируемых испытаниях, которые сочетают в себе управляемый поток экструзии и надежностью конструкции. Результаты предлагают практические применение, раскрывают методы производства геополимеров, способных поддерживать прочность, соответствуя строгим требованиям методов 3D-печати.

Ключевые слова: геополимеры, полиэтиленовые волокна, 3D-печать, реологические свойства, экструдируемость, летучая зола, устойчивые строительные материалы.

Введение

За последние несколько лет 3D-печать, известная также как аддитивное производство, произвела революцию в методах проектирования и строительства [1]. Эта технология позволяет создавать сложные структуры с высокой точностью, сокращая при этом материальные отходы. Она также предоставляет гибкость в формировании дизайнов, которые сложно или невозможно реализовать с помощью традиционных методов. В обсуждении данной области рассматривается один из материалов – геополимер, который является жизнеспособной устойчивой альтернативой цементу [2]. Геополимеры создаются на основе таких отходов, как зола-уноса, и имеют меньший экологический след, а также демонстрируют хорошие механические характеристики. Чтобы геополимеры эффективно применялись в 3D-печати, важ-

но понимать их поведение и свойства текучести в процессе печати. Необходимость изучения реологических свойств материала – того, как он течет под воздействием напряжения, – в контексте 3D-печати является неотъемлемой [3]. Материал должен легко проходить через сопло принтера, но при этом сохранять форму после печати. Если материал будет слишком жидким, он не создаст прочного основания. Если он будет слишком густым, это не только приведет к засорению сопла, но и потребует высокого давления для его прохождения через систему. В результате исследователи постоянно стремятся оптимизировать эти свойства, чтобы повысить их пригодность для 3D-печати [4]. Один из возможных путей – это добавление полиэтиленовых (PE) волокон в смесь геополимеров. Известные своей прочностью и устойчивостью, эти волокна могут способствовать улучшению механических свойств материала.

Геополимеры могут стать прочнее и устойчивее к трещинообразованию за счет добавления волокон PE, что также повышает их долговечность. Это особенно полезно для применения в строительной отрасли. Однако это сопряжено с определенными трудностями. Увеличение содержания волокон не только улучшает целостность материала, но и усложняет его использование. Высокое содержание волокон увеличивает предел текучести и вязкость, что делает материал более жестким при экструзии [4]. Это может привести к проблемам в процессе 3D-печати, таким как засорение сопла и неравномерный поток материала. Исследование направлено на оценку влияния различных количеств волокон PE на текучесть и экструзионные характеристики геополимеров на основе золы-уноса. Оно сосредоточено на смесях с содержанием волокон от 0% до 1% по объему. Для этого мы применили модель Гершеля-Балкли, которая часто используется для описания поведения неньютоновских жидкостей [5, 6]. Эта модель позволяет нам понять поведение текучести и предела текучести при различных концентрациях волокон.

Цель данного исследования – проанализировать баланс между содержанием волокон, реологическим поведением и экструдируемостью, чтобы определить оптимальный уровень содержания волокон, который обеспечивает прочность без ущерба для печати. Полученные результаты помогут в применении геополимеров, армированных волокнами, в реальных проектах 3D-печати, способствуя разработке более устойчивых строительных материалов.

Материалы и методы

Материалы

В данной работе основными материалами используются зола-уноса класса F, полиэтиленовые (PE) волокна и щелочной раствор. Зола-уноса, являющаяся побочным продуктом промышленности, была выбрана в качестве алюмосиликатного прекурсора для геополимерных смесей, соответствующих требованиям стандарта ASTM C618-19 [2]. Состав золы-уноса включает диоксид кремния (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3) и оксид железа (Fe_2O_3), которые вместе составляют около 50% от общего содержания оксидов [7]. Средний размер частиц золы-уноса в этом исследовании составляет примерно 50 микрон, а удельная поверхность по Блейну – 400 м²/кг. Значительное содержание SiO_2 в золе-уноса играет важную роль в формировании ключевой связывающей структуры геополимера. Для создания материалов с высокой прочностью на разрыв, исключительной долговечностью и химической инертностью зола-уноса была объединена с полиэтиленовыми (PE) волокнами. В данном исследовании армирование состояло из полиэтиленовых волокон диаметром от 20 до 25 микрон и длиной 8 мм. Эти волокна с пределом прочности на разрыв около 550 МПа способны повысить пластичность и прочность геополимерной матрицы [8]. Хотя полиэтиленовые волокна химически инертны, они придают важную прочность геополимеру на основе золы-уноса. Исследования широко подтвердили их эффективность в повышении устойчивости к образованию трещин и разрывной прочности, особенно в армированных композитах, используемых в строительстве. Щелочной активатор был приготовлен с использованием гидроксида натрия (NaOH) и силиката натрия (Na_2SiO_3), которые играют важную роль в процессе геополимеризации [9]. Для создания 12 М раствора гидроксида натрия использовалась теплая вода, которая была смешана с NaOH, так как его

растворение сопровождается экзотермической реакцией. Охлажденный до комнатной температуры раствор был смешан с силикатом натрия, который содержал 28% SiO_2, 8% Na_2O и 65% воды. Щелочной активатор был смешан с золой-уноса для инициации процесса геополимеризации. Соотношение щелочного раствора к связующему веществу поддерживалось на уровне 0.4 для всех образцов, чтобы обеспечить постоянство в процессе тестирования.

Пропорции смеси

Геополимерный композит был приготовлен с объемными долями волокон 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% и 1% путем добавления полиэтиленовых волокон. Для каждого образца использовалось 710 г золы-уноса, а объемная доля полиэтиленовых волокон изменялась соответственно. Варьирование долей волокон позволило провести детальный анализ того, как содержание волокон влияет на реологические характеристики и экструдируемость геополимерного материала [10].

Смешивание геополимерных композитов началось с использования сухой смеси золы-уноса и полиэтиленовых волокон. Этот этап был важным для обеспечения равномерного распределения волокон по всей матрице и предотвращения их слипания. На начальной стадии использовался механический миксер, который работал на низкой скорости, для обеспечения однородности состава. После того как сухие ингредиенты были полностью смешаны, в смесь добавлялся щелочной раствор, и миксер работал на более высокой скорости, чтобы волокна равномерно распределились в геополимерной матрице. Эта мера особенно важна в 3D-печати, поскольку равномерная консистенция материала необходима для легкой экструзии и высокого качества структуры. После смешивания геополимерные композиты подверглись тестированию, как описано далее, на реологические свойства, а также на экструдируемость [11].

Реологические испытания

Для оценки реологических свойств геополимерных смесей использовался ротационный реометр Anton Paar MCR 102 [12] с параллельными пластинами. В эксперименте использовалась пластина диаметром 25 мм, а зазор между пластинами составлял 1 мм. Для обеспечения постоянства всех образцов испытания проводились при температуре 25 °C в контролируемых условиях. Перед началом каждого сбора данных реометр калибровался с использованием стандартного масла с известной вязкостью, чтобы гарантировать точность сбора данных [13].

Во время испытаний на геополимерные смеси воздействовали сдвиговые скорости в диапазоне от 1 до 100 $с^{-1}$. Проводился сбор данных о сдвиговом напряжении и скорости сдвига, на основе которых рассчитывались ключевые реологические параметры, такие как предел текучести, вязкость и индекс течения. Эти параметры были получены с использованием модели Гершеля-Балкли, которая обычно используется для описания поведения неньютоновских жидкостей [14]. Модель Гершеля-Балкли задает систему для расчета предела текучести, индекса консистенции и индекса потока материала, а также определяет, является ли его поведение сдвигающимся разжижением или сдвигающимся утолщением. Уравнение Гершеля-Балкли представляется следующим образом:

$$\tau=\tau_y+K\cdot\gamma^n,$$

где: τ – сдвиговое напряжение, τ_y – предел текучести, K – индекс консистенции, γ – скорость сдвига, n – индекс потока материала. Информация, собранная в ходе этих испытаний, предоставила понимание характеристик потока, армированных волокнами геополимерных композитов, с акцентом на их применение в 3D-печати. Результаты позволили определить оптимальное содержание волокон, которое обеспечивает идеальный баланс реологических качеств и экструзируемости. Смеси с более высоким содержанием волокон, как правило, демонстрировали увеличенный предел текучести и вязкость, что могло усложнить процесс экструзии. Напротив, смеси с более низким содержанием волокон демонстрировали более легкое течение и меньшую сопротивляемость сдвиговым силам, что делало их более подходящими для применения в процессах экструзии.

Анализ экструдируемости

Экструдируемость геополимерных смесей была оценена с помощью поршневого экструдера, разработанного для воспроизведения процесса экструзии, который используется в 3D-печати [6]. Поршневой экструдер был оснащен цилиндрическим корпусом диаметром 40 мм и длиной 200 мм (рисунок 1) [15]. Свежий геополимерный композит был помещен в цилиндр, и поршень создавал давление с контролируемой скоростью, где длина сопла составляла 64 мм, а диаметр – 8 мм. В экструзионных тестах давление прикладывалось с разной скоростью, от 5 мм/с до 30 мм/с, чтобы определить влияние скорости экструзии на поведение геополимерных композитов при течении [3]. В цилиндре были установлены датчики давления, которые фиксировали данные в реальном времени о смещении и скорости поршня относительно давления экструзии. Такая система позволила провести детальное исследование того, как содержание волокон и скорость экструзии влияют на экструдируемость геополимерных смесей.

Основным критерием для оценки экструдируемости была плавность и однородность процесса экструзии. Смеси с высоким содержанием волокон часто сталкивались с проблемами при экструзии, такими как засорение или непостоянный поток, что было связано с увеличением вязкости и предела текучести [16]. Эти проблемы были особенно заметны при высоком содержании волокон (0.75% и 1%), где для начала потока материала требовалось более высокое давление, что приводило к блокировкам в сопле. Напротив, смеси с более низким содержанием волокон (0.25% и 0.5%) демонстрировали более плавную экструзию и требовали меньшего давления, что указывало на их лучшую пригодность для использования в 3D-печати. Испытания на экструдируемость помогли определить оптимальное содержание волокон для 3D-печати геополимеров, армированных волокнами. После анализа данных о давлении и потоке стало ясно, что смеси с содержанием волокон в диапазоне от 0.25% до 0.5% обеспечивают оптимальное сочетание улучшенных механических свойств и легкости экструзии [17]. Такой уровень содержания волокон позволил достичь стабильной экструзии с минимальными пиковыми нагрузками давления или изоляцией материала, что идеально подходит для процессов аддитивного производства.

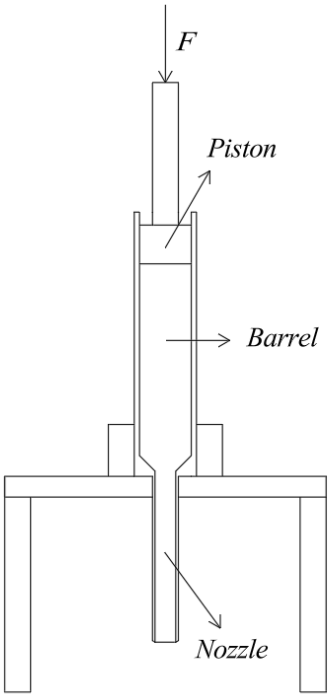

Рисунок 1 – Схема поршневого экструдера

Результаты и обсуждение

Реологические свойства

Модель Гершеля-Балкли позволила изучить реологическое поведение армированных волокнами геополимерных смесей и определить такие важные параметры, как индекс текучести и индекс консистенции. Анализ показал заметную взаимосвязь между реологическими характеристиками и объемом волокон в геополимерных смесях. Более высокое содержание волокон вызывало увеличение как предела текучести, так и вязкости в геополимерных смесях [14].

Смесь без волокон (PE0) показала наименьший предел текучести и вязкость, в то время как смесь с максимальным содержанием волокон (PE1) продемонстрировала значительно более высокий предел текучести, что свидетельствует о том, что волокна улучшили структурную целостность материала, а также его сопротивление деформации. Эта тенденция была ожидаемой, так как волокна могут создавать физическое препятствие внутри матрицы и повышать давление, необходимое для начала потока. Дополнительные волокна приводят к увеличению предела текучести и показывают склонность материала к уменьшению вязкости при больших сдвиговых усилиях [4].

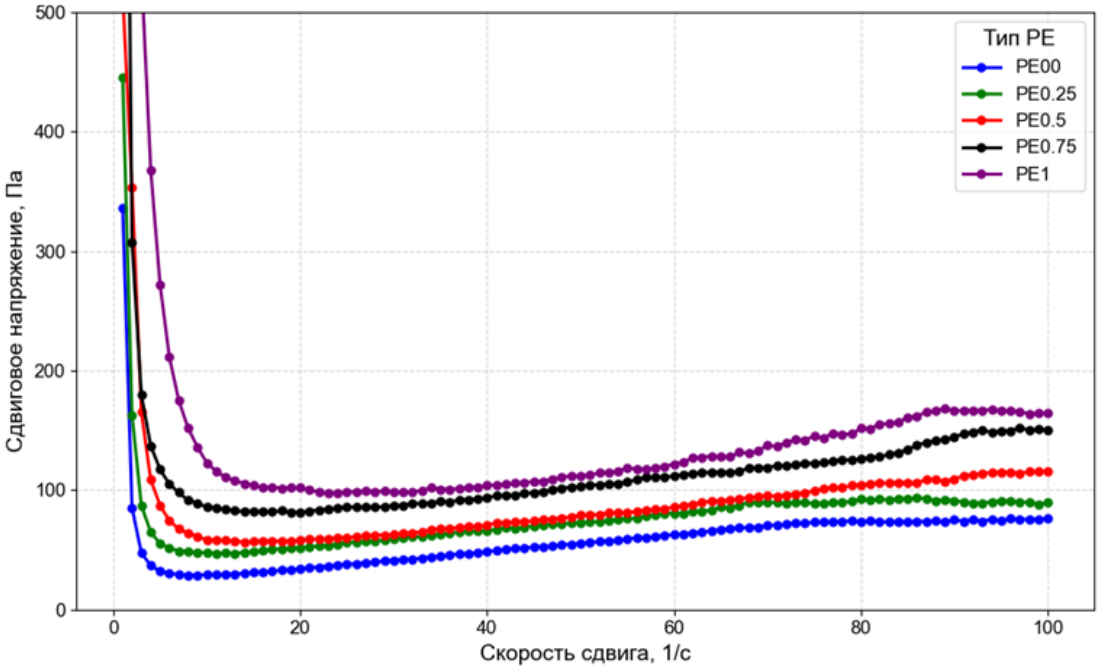

Рисунок 2 – Напряжение сдвига в зависимости от скорости сдвига геополимеров, армированных волокном

Как показано на рисунке 2, сдвиговое напряжение увеличивалось с увеличением содержания волокон при низких скоростях сдвига, однако все смеси демонстрировали поведение, характерное для псевдопластичных жидкостей, что выражалось в уменьшении наклона кривых при высоких скоростях сдвига. Это означает, что, хотя смеси с высоким содержанием волокон изначально требуют большего усилия для начала потока, они демонстрируют лучшую текучесть при приложении сдвига. Индекс консистенции (K), который отражает вязкость смеси, также показал значительное увеличение с ростом содержания волокон, как показано в таблице 1. Это указывает на то, что более высокое содержание волокон приводит к более густой смеси, что может усложнить процессы экструзии. Однако индекс текучести несколько уменьшился при увеличении содержания волокон, что подтверждает поведение псевдопластичных жидкостей для геополимерных смесей. Такой реологический профиль делает геополимеры,

армированные волокнами, подходящими для использования в 3D-печати, где важен баланс между жесткостью материала и его текучестью для успешной экструзии [4, 15, 18].

Таблица 1 – Реологические свойства геополимерных смесей

ID Смеси	Предел текучести, (Па)	Индекс консистенции, K (Па-с^n)	Индекс текучести, n
PE0	31.55	5.67	0.721
PE0.25	34.11	6.78	0.718
PE0.5	51.33	9.32	0.699
PE0.75	67.33	11.72	0.648
PE1	93.45	10.15	0.687

Экструдируемость

В данном исследовании анализировались как сила, необходимая для экструзии геополимерных смесей, так и плавность процесса экструзии. Смеси с меньшим содержанием волокон показали лучшую и более плавную экструзию при меньшем усилии по сравнению с теми, у которых было большее содержание волокон. Для начала и поддержания экструзии на более высоких скоростях требовалось большее давление для смесей с высоким содержанием волокон.

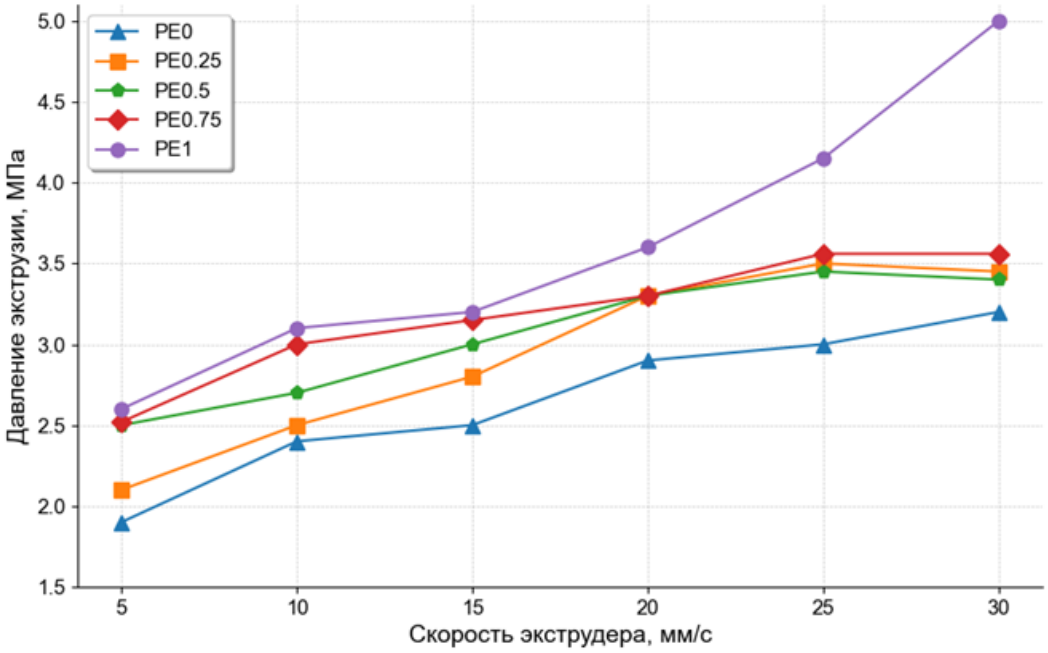

Рисунок 3 – Давление экструзии в зависимости от скорости экструзии для геополимеров, армированных волокном

Как показано на рисунке 3, давление, необходимое для экструзии, резко увеличивалось с ростом содержания волокон, особенно для смесей PE0.75 и PE1. Смесь PE0 показала наименьшее давление экструзии, что указывает на то, что отсутствие волокон позволило легче протекать материалу через сопло. Смеси PE0.25 и PE0.5 продемонстрировали баланс между давлением и текучестью, показывая, что умеренное содержание волокон улучшает механические свойства, не усложняя процесс экструзии.

Анализ влияния содержания волокон на экструдируемость

Смеси с содержанием волокон 0.25% и 0.5% продемонстрировали оптимальную экструдируемость, обеспечивая баланс между улучшенными механическими свойствами и приемлемой текучестью. Эти смеси требовали меньшего давления для экструзии и показывали более плавный и непрерывный поток во время процесса экструзии. При содержании волокон 0.75% и 1% начали возникать проблемы, такие как засорение и комкование, а также сегрегация материала из-за высокого давления, необходимого для экструзии. Было установлено, что существует предел количественного включения волокон в геополимер, за пределами которого эффективная экструзия становится невозможной. Результаты показывают, что диапазон содержания волокон от 0.25% до 0.5% является оптимальными для приложений, где требуется плавная экструзия, таких как 3D-печать. За пределами этого диапазона преимущества армирования волокнами в плане улучшенных механических свойств могут быть перевешены сложностями, связанными с экструзией.

Понимание баланса между реологией и экструдируемостью подчеркивает важность оптимизации содержания волокон для достижения как улучшенных механических свойств, так и легкости экструзии, что имеет ключевое значение для практического применения армированных волокнами геополимеров в аддитивном производстве.

Влияние содержания полиэтиленового волокна

Увеличение содержания полиэтиленовых (PE) волокон в геополимерных композитах на основе золы-уноса значительно изменяет их реологические и экструзионные свойства. Увеличение содержания волокон приводит к повышению вязкости и предела текучести в смесях, что свидетельствует об усиленном сопротивлении потоку. Формирование физической сети из волокон ограничивает движение частиц и требует приложения больших сдвиговых усилий для начала потока. Разница между смесями PE0 и PE1 стала очевидной из-за более высокого предела текучести и вязкости, наблюдаемых в PE1. Хотя включение волокон PE улучшает механические свойства материала, особенно в отношении прочности на разрыв и устойчивости к трещинообразованию, это связано с компромиссом: увеличение количества волокон усложняет экструзию смеси. Повышение вязкости и предела текучести затрудняет плавный и равномерный поток через сопло. В 3D-печати материал должен достаточно хорошо выходить при экструзии, но при этом сохранять свою целостность после выхода из сопла. При содержании волокон менее 0.5% и на уровне 0.25% смесь демонстрировала оптимальные механические свойства и хорошую текучесть для экструзионных систем.

Эти выводы соответствуют другим исследованиям в данной области, которые также сообщали о схожих эффектах армирования волокнами на реологию и экструзию в цементных композитах. Например, исследование Феррары и др. [19] показало, что увеличение содержания волокон в бетонных смесях улучшало прочностные свойства на разрыв, но приводило к трудностям при экструзии из-за повышения вязкости. Однако в некоторых исследованиях, таких как исследование Боса и др. [20], были успешно использованы несколько более высокие содержания волокон в 3D-печати, что предполагает, что оптимальное содержание волокон может варьироваться в зависимости от конкретного материала и используемого экструзионного оборудования. Результаты данного исследования подтверждают, что умеренное содержание волокон (до 0.5%) обеспечивает наилучший компромисс для геополимерных композитов на основе золы-уноса, в то время как более высокое содержание волокон приводит к нежелательным проблемам с экструзией.

Проблемы экструзии

Исследование показало, что использование более высоких концентраций волокон вызывает множество проблем в процессе экструзии. С увеличением содержания волокон значительно возрастает предел текучести и вязкость, что делает процесс экструзии более сложным и менее надежным. Для начала и поддержания экструзии необходимо применять высокое давление для смесей с большим содержанием волокон. Волокна образуют более прочную структуру, что увеличивает сопротивление потоку. Интенсивная обработка горячей водой может привести к таким осложнениям, как засорение сопла и сокращение срока службы оборудования.

При более высоких уровнях волокон увеличиваются вязкость и псевдопластичное поведение, что усугубляет эти трудности. Процессы экструзии часто выигрывают от псевдопластичного поведения, которое способствует облегчению потока под действием сдвиговых усилий, однако высокий предел текучести в этих смесях препятствует движению жидкости на начальных этапах. На начальном этапе экструзии материал может течь, однако значительные требования к давлению могут вызвать блокировки в узких отверстиях, часто используемых в 3D-печати. При необходимости высокого содержания волокон для достижения структурных или эксплуатационных целей требуется тщательный анализ реологических свойств материала. При этом содержание волокон должно быть оптимизировано для достижения как механических преимуществ, так и необходимой текучести для эффективной печати. В случаях создания сложных форм или тонких секций, которые зависят от надежного потока, более низкие проценты волокон (0.25%–0.5%) оказываются более эффективными.

Применение

Результаты данного исследования имеют важное значение для применения армированных волокнами геополимеров в аддитивном производстве в строительной отрасли, поскольку 3D-печать становится все более распространенной. Использование геополимеров с армированными волокнами для 3D-печати обеспечивает значительные преимущества, связанные с механической прочностью и устойчивостью к трещинам. В применениях, связанных со строительством, таких как формирование несущих стен или сложных компонентов, эти свойства крайне важны, поскольку материал должен сохранять свою прочность. Печать структурных элементов, таких как балки или колонны, с использованием армированных волокнами геополимеров может обеспечить необходимую прочность для соблюдения строительных норм и повышения безопасности, уменьшая необходимость в дополнительном укреплении. Геополимеры выделяются как более устойчивый выбор по сравнению с традиционными цементными материалами и привлекают внимание со стороны экологически ориентированных строительных проектов. Присутствие полиэтиленовых волокон усиливает прочность и долговечность печатных конструкций, снижая потребность в последующих ремонтах или заменах на протяжении времени.

Однако, как показано в данном исследовании, производительность экструзии армированных волокнами геополимеров должна быть тщательно изучена. В тех моментах, где материал должен плавно и непрерывно проходить через сопло, например, при печати больших, непрерывных конструкций или сложных дизайнов, важно использовать содержание волокон, которое не будет препятствовать процессу экструзии. Согласно результатам данного исследования, содержание волокон в диапазоне от 0.25% до 0.5% обеспечивает лучший баланс между механической прочностью и экструдируемостью. Это делает их идеальными для широкого круга строительных применений, включая печать стен и сборных строительных компонентов. Для более сложных или высокопроизводительных применений, требующих повышенного содержания волокон, потребуется дополнительная оптимизация процесса экструзии. Это может включать регулировку скорости печати, размера сопла или даже разработку новых типов волокон или формулировок смесей, которые сохранят высокие механические характеристики без ухудшения экструдируемости. Результаты данного исследования могут способствовать разработке таких составов, делая геополимеры, армированные волокнами, жизнеспособным решением для крупномасштабного устойчивого строительства с применением технологий 3D-печати.

Выводы

В данном исследовании было рассмотрено, как содержание полиэтиленовых (PE) волокон влияет на свойства экструзируемых геополимерных смесей на основе золы-уноса. В результатах исследования была выявлена очевидная связь между содержанием волокон и характеристиками движения смесей. Увеличение содержания волокон привело к значительному повышению как предела текучести, так и вязкости смесей, что показывает, что материал ста-

новится более жестким при увеличении количества волокон. Механические преимущества увеличиваются при таком подходе, однако это усложняет процесс экструзии, требуя большего давления для начала и поддержания потока.

Оптимальный диапазон содержания волокон, определенный в данном исследовании, составляет от 0.25% до 0.5%. В этом диапазоне геополимерные композиты демонстрировали наилучший баланс между улучшенными механическими свойствами и приемлемой экструдируемостью. Смеси в этом диапазоне легче экструдировались, требовали меньшего давления и демонстрировали более плавное и стабильное поведение потока. Напротив, смеси с более высоким содержанием волокон (0.75%–1%) сталкивались с такими проблемами, как засорение и увеличение давления экструзии, что делало их менее подходящими для применения в 3D-печати, где требуется непрерывная и плавная экструзия.

Полученные данные подчеркивают важность поиска баланса между армированием волокнами и экструдируемостью в приложениях для 3D-печати. Армированные волокнами геополимеры предлагают значительные механические преимущества, однако необходима тщательная оптимизация содержания волокон для обеспечения эффективной и стабильной экструзии. Для практических применений, особенно в строительстве, где печатаются крупные конструкции, выбор содержания волокон должен учитывать как механические характеристики, так и поведение материала при экструзии. В будущем исследования могут проанализировать составы смесей для улучшения как реологических характеристик, так и экструдируемости, варьируя типы и длину волокон. Исследование уникальных типов волокон, таких как натуральные и переработанные волокна, может представить более экологически чистые альтернативы, которые улучшат реологию и механические характеристики геополимерных композитов. Изучение различных методов экструзии или конструкций сопел может помочь решить проблемы, возникающие при повышенном содержании волокон, и расширить практическое использование геополимеров, армированных волокнами, в аддитивном производстве.

Информация о финансировании

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR21882278 «Создание строительно-технического инжинирингового центра для оказания полного цикла аккредитованных услуг строительной и дорожно-строительной отрасли Республики Казахстан»)

ЛИТЕРАТУРА

1 Gibson I., Rosen D. and B. Stucker. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, second edition, 2015. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3.

2 Davidovits J. Properties of Geopolymer Cements, First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 1994.

3 Roussel N. Rheology of fresh concrete: From measurements to predictions of casting processes, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2007, vol. 40, no. 10. https://doi.org/10.1617/s11527-007-9313-2.

4 Liu J. and Lv C. Properties of 3D-Printed Polymer Fiber-Reinforced Mortars: A Review, 2022. https://doi.org/10.3390/polym14071315.

5 Barnes H.A. Thixotropy – A review, 1997. https://doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00004-9.

6 Wolfs R.J.M., Bos F.P., and Salet T.A.M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing, Cem Concr Res, 2018, vol. 106. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001.

7 Van Jaarsveld J.G.S., Van Deventer J.S.J., and Lukey G.C. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers, Chemical Engineering Journal, 2002, vol. 89, no. 1–3. https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6.

8 Brandt A.M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering, Compos Struct, 2008, vol. 86, no. 1–3. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006.

9 Meddah M.S. and Bencheikh M. Properties of concrete reinforced with different kinds of industrial waste fibre materials, Constr Build Mater, 2009, vol. 23, no. 10. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.017.

10 Das D. and Rout P.K. Synthesis, Characterization and Properties of Fly Ash Based Geopolymer Materials, J Mater Eng Perform, 2021, vol. 30, no. 5, https://doi.org/10.1007/s11665-021-05647-x.

11 Qaidi S. et al. Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis, Materials, 2022, vol. 15, no. 20. https://doi.org/10.3390/ma15207098.

12 Barnes H.A. A Handbook of Elementary Rheology, 2000, vol. 6, no. 4.

13 Whorlow R.W. Rheological techniques, 1980, https://doi.org/10.1115/1.3138312.

14 Chhabra R.P. and Richardson J.F. Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications, 2008. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7.

15 Le T.T., Austin S.A., Lim S., Buswell R.A., Gibb A.G.F., and Thorpe T. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 2012, vol. 45, no. 8. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z.

16 Chen Y. et al. Can superabsorbent polymers be used as rheology modifiers for cementitious materials in the context of 3D concrete printing?, Constr Build Mater, 2023, vol. 371. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130777.

17 Ricciotti L., Apicella A., Perrotta V., and Aversa R. Geopolymer Materials for Extrusion-Based 3D-Printing: A Review, 2023. https://doi.org/10.3390/polym15244688.

18 Papanastasiou T.C. Flows of Materials with Yield, J Rheol (N Y N Y), 1987, vol. 31, no. 5. https://doi.org/10.1122/1.549926.

19 Ferrara L., Park Y.D., and Shah S.P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete, Cem Concr Res, 2007, vol. 37, no. 6. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.03.014.

20 Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., and Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing, Virtual Phys Prototyp, 2016, vol. 11, no. 3. https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867.

[1]*Сариев Б.,
PhD, ORCID ID: 0000-0002-2637-9704,
*e-mail: b.sariyev@astanait.edu.kz
[2]Амрин А.,
PhD, ORCID ID: 0000-0001-7567-6695,
e-mail: andas.amrin@nu.edu.kz
[3]*Джексембаева А.,
PhD, ORCID ID: идентификаторы: 0009-0009-6153-9580,
*e-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru
[3]Қоңқанов М.,
PhD, ORCID ID: идентификаторы: 0009-0006-9365-4127,
e-mail: marcon@metrology.kz

[1]Астана IT университеті, Астана қ., Қазақстан
[2]Назарбаев университеті, Астана қ., Қазақстан
[3]Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ, Қазақстан

АДДИТИВТІ ӨНДІРІС ҮШІН ПОЛИЭТИЛЕН ТАЛШЫҚТАРМЕН КҮШЕЙТІЛГЕН ҰШПА КҮЛ ГЕОПОЛИМЕРІНІҢ РЕОЛОГИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІН ТАЛДАУ

Аңдатпа

3D басып шығару берік және күрделі құрылымдарды жасаудың тиімді тәсілі, сонымен қатар ресурстарды үнемдеуге мүмкіндік береді. Кәдімгі цемент материалдарының орнына күлді геополимерлердің экологиялық артықшылықтары мен жоғары механикалық қасиеттері жақсы танымал. Бұл зерттеу полиэтилен (PE) талшықтарын қосу материалдардың қасиеттерін қалай өзгертетінін, сондай-ақ әртүрлі концентрациялардың композиттік материалдың ағындық сипаттамаларына және өндіру қабілетіне қалай әсер ететінін зерттейді. Талшықты күшейтілген геополимерлердегі Ньютондық емес сипаттамалар Гершель-Балкли моделі арқылы талданады. Тұтқырлық және ағын әрекеті сияқты маңызды реологиялық факторларды дәл өлшеу арқылы

зерттеушілер материалдың 3D басып шығару процесіне әсерін бағалай алады. Бұл зерттеу нәтижелері полиэтилен (PE) талшықтарын қосу материалдың беріктігін арттырып, сынуға төзімділікті жақсартады, бірақ сонымен бірге оның принтер саптамасынан өтуіне кедергі болатын тұтқырлық пен шығымдылық кернеуін арттыратынын көрсетеді. Талшықтың оңтайлы қоспасы бақыланатын сынақтар нәтижесінде жоғары төзімділікпен үйлескен экструзия ағыны мен құрылымның сенімділігін қамтамасыз етеді. Зерттеу нәтижелері 3D басып шығару әдістерінің талаптарын қанағаттандыра отырып, беріктігін сақтайтын геополимерлерді өндіру әдістерін әзірлеуге мүмкіндік береді және олардың практикалық қолданбаларын ашады. Сонымен қатар, бұл жұмыс талшықтарды қосу геополимерлердің қасиеттерін қалай өзгертетінін терең түсінуге көмектесіп, жасыл құрылыс материалдары жөніндегі жалпы диалогты байытады. Тәжірибелік қолдануда құрылыс материалдарының тиімділігі мен икемділігін арттыру үшін күрделі талшық жүйелерін және креативті қоспалар тәжірибесін кейінгі зерттеулерде қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Тірек сөздер: геополимер, полиэтилен талшықтары, 3D басып шығару, реологиялық қасиеттер, экструдция, ұшпа күл, тұрақты құрылыс материалдары.

[1]*Sariyev B.,
PhD, Assistant Professor, ORCID ID: 0000-0002-2637-9704,
e-mail: b.sariyev@astanait.edu.kz
[2]Amrin A.,
PhD, Postdoctoral Scholar, ORCID ID: 0000-0001-7567-6695,
e-mail: andas.amrin@nu.edu.kz
[3]*Jexembayeva A.,
PhD, ORCID ID: 0009-0009-6153-9580,
e-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru
[3]Konkanov M.,
PhD, ORCID ID: 0009-0006-9365-4127,
e-mail: marcon@metrology.kz

[1]Astana IT University, Astana, Kazakhstan
[2]Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan
[3]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

ANALYSIS OF RHEOLOGICAL PROPERTIES IN PE FIBER-REINFORCED FLY ASH GEOPOLYMER FOR ADDITIVE MANUFACTURING

Abstract

The leading edge of construction advancements is represented by 3D printing which creates durable and elaborate structures and minimizes resource wastage. As a viable substitute for regular cement materials highlights the ecological benefits and strong mechanical traits of fly ash geopolymers. This study investigates how the addition of polyethylene (PE) fibers alters these properties and how varying concentrations influence the flow behavior and capability of producing the composite material. The analysis of non-Newtonian behavior in these fiber-reinforced geopolymers is conducted using the Herschel-Bulkley model. By precisely measuring critical rheological factors such as viscosity and flow behavior researchers can evaluate how they influence 3D printing processes. This research reveals that adding PE fibers boosts the material's strength and improves resistance against cracking while also elevating the viscosity and yield stress that can hinder its passage through the printer's nozzle. An optimal blend of fiber content emerges from controlled tests that align increased durability with controllable extrusion flow and structure reliability. The results offer deep practical applications that reveal methods for producing geopolymers that can maintain strength while meeting the exacting requirements of 3D printing methods. Research deepens the grasp of how adding fibers alters the properties of geopolymers and enriches the overall dialogue on green building materials. It opens doors for subsequent analysis of complex fiber systems and creative additive practices to boost the effectiveness and resilience of construction materials in practical use.

Key words: geopolymers, polyethylene fibers, 3D printing, rheological properties, extrudability, fly ash, sustainable building materials.

Дата поступления статьи в редакцию: 14.10.2024