

# Передовые технологии изготовления керамических оболочек ADBOND® QUIKSET Быстро сохнущая суспензия

Gavin Dooley<sup>1</sup>, Grant Bradley<sup>1</sup>, Manuel Guerra<sup>2</sup>, M Everden<sup>1</sup>

<sup>1</sup>REMET UK, Ltd. <sup>2</sup>REMET PIC Inc.

## Автореферат

Новая система Remet QUIKSET™ на основе улучшенных полимеров подтверждает преимущество быстрого высыхания при сохранении воспроизводимости и устойчивости параметров суспензии и их поддержания. Для количественного анализа надежности и производительности суспензии QUIKSET™ была проведена серия экспериментов для сравнения данной суспензии с наиболее популярной суспензией Remet, широко применяемой в промышленности в настоящее время. Измерения модулей суспензии QUIKSET™ и традиционной суспензии Remet методом ДМА в процессе сушки позволили точно определить точку желирования каждой системы. Измерения изменения температуры в процессе сушки были использованы для сравнения интенсивности испарения воды из суспензии QUIKSET™ и традиционной суспензии Remet в одинаковых условиях. Результаты подтверждают, что система QUIKSET™ не только быстрее желируется, но и скорость испарения воды не зависит от протекания процесса желирования. Приведены исследования, показывающие, что система QUIKSET™ обладает более высокой «зеленой» прочностью в сравнении с традиционной системой с минимальным временем сушки при производстве керамической оболочки. Данная технология представляет собой улучшенную

схему перехода от этил силиката к водным связующим на литейных предприятиях.

## **Введение**

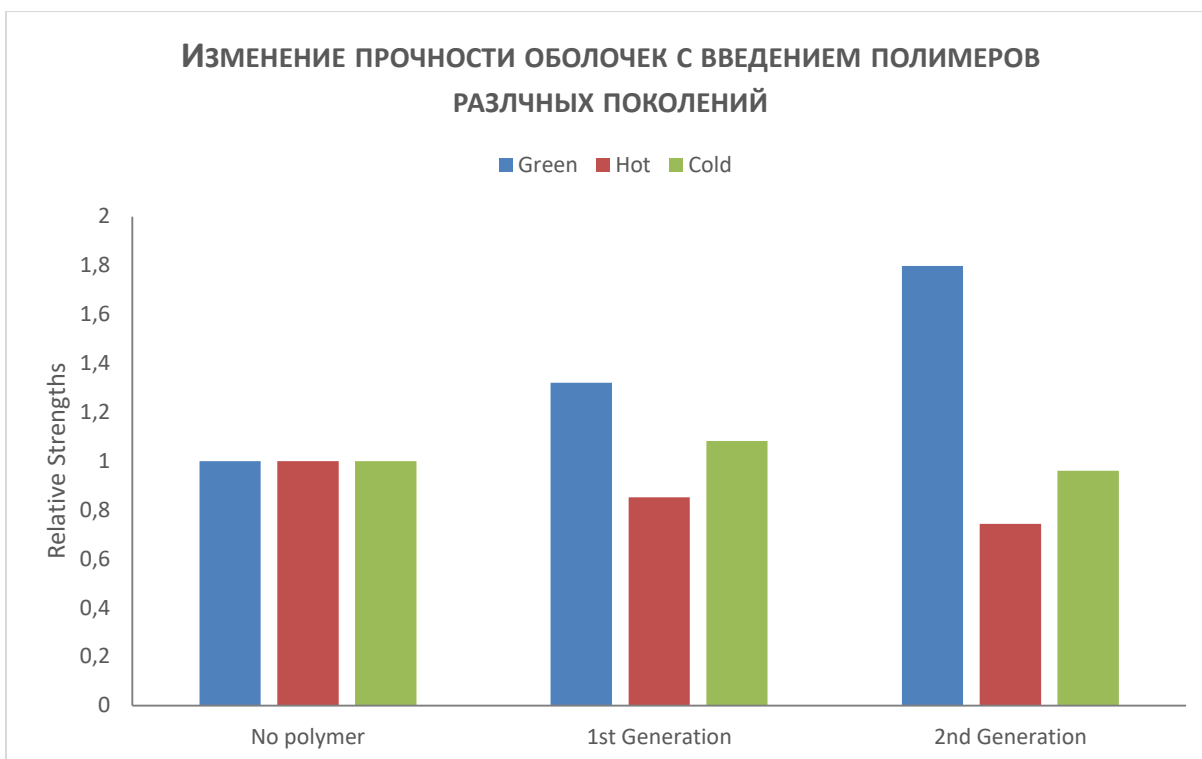
С растущими потребностями производства ЛВМ в уменьшении времени производственного цикла при внедрении новых технологий, включая различные добавки, было предпринято много попыток по повышению производительности участка производства керамических оболочек. Данные попытки имели ограниченный успех и приведены ниже. Переход от этил силикатного связующего к связующим на водной основе может быть проблемным, так как литейное производство сталкивается с необходимостью контроля атмосферы для сушки водных связующих.

Remet разработал новый материал, который увеличивает производительность с одновременным улучшением прочности керамических оболочек. Данный материал - QUIKSET™ - новый концентрат полимера, испытания которого приведены в статье.

## **Преыдущие исследования**

Возможности исследования и развития полимеров постоянно растут с момента их первого применения в керамических оболочках. Добавление полимера оказывает влияние на «зеленую» прочность оболочки в процессе сушки и вытопки воска в бойлерклаве с одновременным сокращением времени сушки. При последующем отжиге оболочки полимер улетучивается, создавая поры, ослабляющие оболочку для последующего легкого извлечения отливки. При охлаждении оболочка имеет

одинаковую прочность с оболочкой без добавления полимера, что позволяет легкое извлечение отливки. Это можно увидеть на рисунке 1, приведенном ниже.

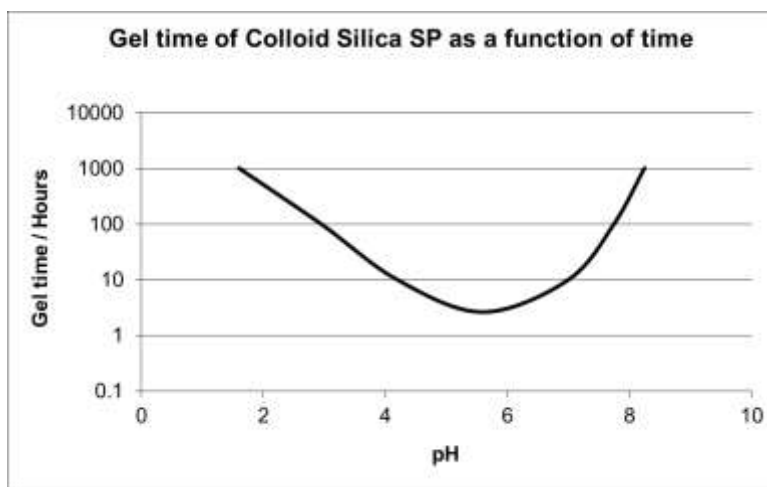


*Рисунок 1 Изменение прочности оболочек с введением полимеров различных поколений*

С увеличением прочности проблемы растрескивания оболочек при вытопке в бойлерклаве и дефекты сушки выражены гораздо меньше. Однако, время сушки таких систем все еще достаточно продолжительное, что сказывается на общей производительности процесса ЛВМ. В данной работе мы представим полимерный концентрат QUIKSET™, который значительно снижает время сушки без необходимости смены оборудования или техники нанесения суспензии.

## ОСНОВЫ СУШКИ

Существуют два способа сушки коллоидного диоксида кремния, одним из которых является изменение pH до приблизительно 7, как показано на рис. 2.



*Рисунок 2 Время желирования в зависимости от pH*

Второй способ заключается в удалении воды, что приводит частицы диоксида кремния в соприкосновение, что позволяет желирование и создание твердой матрицы. Последняя затем упрочняется, связывая частицы керамики.

В керамической оболочке изменение pH затруднительно вследствие сокращения «времени жизни» суспензии и созданием нестабильного процесса. Увеличения испаряемости воды пытались достичь разными методами, включающими в себя:

1. **Быструю воздушную сушку** – Система с высокой скоростью воздушного потока была представлена для увеличения испаряемости воды (1). Инфракрасная технология использует быструю испаряемость воды и в то же время компенсирует изменение температуры воска инфракрасным излучением для поддержания размерной точности модели.

2. **Микроволновая сушка** – Микроволновая сушка была использована для удаления воды из оболочки (2). Данная система позволяет контролировать условия сушки, влияющие на механические свойства оболочек.
3. **Быстрая сушка оболочек** – Быстрая сушка оболочек заключается в применении суперабсорбирующего полимера для уменьшения времени сушки удалением воды из коллоидной системы и поглощением ее специальным полимером. У данного метода имеются и недостатки, заключающиеся, в том числе, и в уменьшении прочности керамической оболочки (3).
4. **Системы на основе осушителей** – Данные системы используют силиконовый гель для удаления воды в системе в слой обсыпки. Как и раньше, недостаток данного метода – удержание воды в оболочке в процессе сушки.

Для процессов сушки №1 и №2, указанных выше, необходимы вложения на приобретение нового оборудования. Однако, для некоторых производств данные вложения могут быть несущественны. Для процессов №3 и №4 удержание воды в оболочке в процессе сушки может привести к снижению прочности оболочки, что может привести к большому растрескиванию и вспучиванию оболочки при обжиге. Remet представляет инновационную технологию QUIKSET™ для ускорения удаления воды из оболочек, что помогает практически полностью избежать удержания воды в системе во время сушки между нанесениями слоев. Использование системы специальных полимеров позволяет огеливание суспензии, а также оставляет свободные пути для удаления воды к поверхности оболочки с ее последующим удалением. Данный процесс наглядно показан на Рис.3 Облегченное желирование суспензии в керамической оболочке.

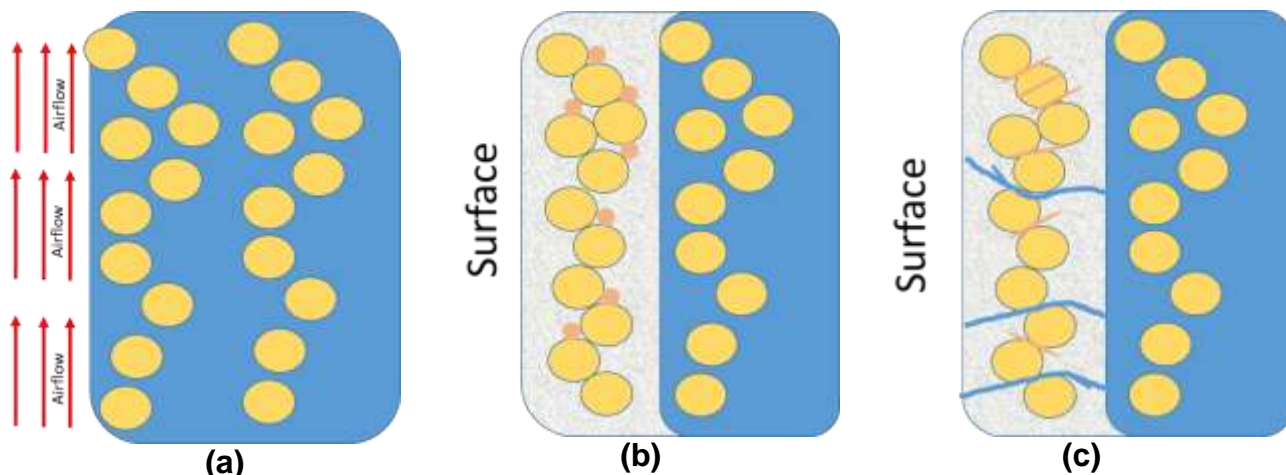


Рисунок 3. Облегченное желирование суспензии в керамической оболочке (а) отсутствие желирования (б) процесс желирования традиционных водных связующих (в) процесс желирования QUIKSET™

## Материалы и методы

### Рецептура суспензии

Для приготовления опытных суспензий использовались следующие рецептуры:

Таблица 1 Рецептуры суспензий для механических испытаний

Компонент	Premium	QuikSet
Плавленный кварц 200 Mesh	62.92%	60.87%
HCSi	31.46%	30.43%
Полимер	4.5% Premium	7.60% QuikSet
Смачиватель	0.90%	0.87%
Burst 100	0.22%	0.22%

Девять последующих слоев и один «без обсыпки» были нанесены для производства оболочки с интервалом на сушку один час между слоями.

Указанные ниже суспензии были использованы для ДМА и термического анализа.

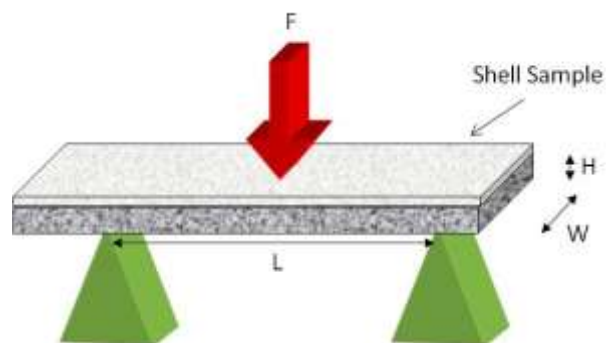
Таблица 2 Рецептуры суспензий, использованных для ДМА и термического анализе

Компонент:	Remasol Premium Plus	QuikSet
Циркон 200	62 %	62%
Связующее	32.00%	30.40% SP 30
Полимер	6%	7.60%

## Механический анализ

Упругие тесты используются для установления упругой прочности оболочки. Прочность керамической оболочки – ее стойкость к повреждению в процессе ЛВМ. Оболочка подвергается многим внешним напряжениям в процессе вытопки воска, предварительного нагрева, заливке металла и его затвердевания. Способность противостоять разлому в этих процессах – наиболее важная задача при построении качественной керамической оболочки.

Испытания проводились в соответствии со стандартом BS 1902, часть 4, раздел 4.4: 1984 (5). Образцы пластин размером 20x80 мм были протестированы на машине Lloyd xxxx. Тест на упругость проводился с использованием оборудования, указанного на рис. 3.



*Рисунок 3 Схематическое изображение трехточечного изгиба*

Образцы тестировались в «зеленом», горячем (1000 С), прокаленном и охлажденном после прокаливания состояниях. Скорость приложения нагрузки во всех тестах составляла 1мм/мин. Прочность разлома  $\sigma_{Flexural}$  была вычислена по уравнению 1.

$$\sigma_{3\_Point\_Flexural} = \frac{3P_{MAX}L}{2WH^2}$$

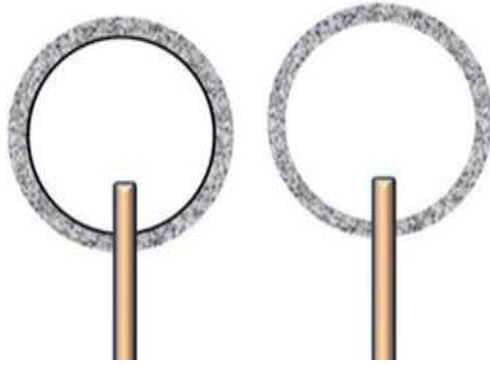
Уравнение 1

где  $P_{MAX}$  нагрузка при разломе,  $L$ ,  $W$  и  $H$  -длина, ширина и толщина поврежденной части образца.

Паропроницаемость – важное свойство керамических оболочек. Паропроницаемость оболочек позволяет удалить воздух в процессе получения отливки, снижая таким образом обратное давление и вероятность недолива. Удаление воздуха также снижает риск растрескивания оболочки под внутренним давлением. Высокая паропроницаемость также облегчает удаление оболочек. Измерение паропроницаемости позволяет оценить количество «соединенных пор» в оболочке. Также паропроницаемость является индикатором прочности оболочки.

Испытания были произведены в соответствии с BS 1902: Section 10.2:1994. Образцы были изготовлены на основе трех звездного теннисного шарика по стандартам «Международной Федерации настольного тенниса» (ITTF) с прутками из непаропроницаемого муллита ( $Si_4Al_6O_{13}$ ) при температуре 1000°C (6).





*Рисунок 4 Паропроницаемость образца с и без теннисного мячика.*

Измерения паропроницаемости проводились с интервалом максимально 1 час для оценки эффекта синтеринга на анализируемых образцах. Уравнение 2 было использовано для определения паропроницаемости образцов:

$$\mu = \frac{sV_c\eta}{a\Delta P} \quad \text{Уравнение 2}$$

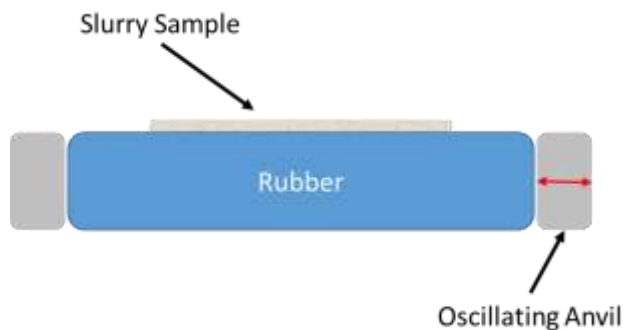
где  $\mu$  - паропроницаемость,  $s$  - толщина стенки образца,  $V_c$  - объемная пропускная способность,  $\eta$  – динамическая вязкость воздуха при повышенной температуре,  $a$  – внутренняя поверхность теннисного мяча and  $\Delta P$  - разность давлений.

### **Динамический механический анализ (ДМА)**

Динамический механический анализ (ДМА) – механический метод анализа свойств материала, динамический отвечающего на внешнее воздействие. Данным тестом можно проанализировать расширение и усадку воска, динамическую нагрузку воска при разных температурах, желирование суспензии.

Определенный объем суспензии был нанесен тонким слоем на резиновый образец, затем данный образец был подвержен нагрузке для колебания с постоянным отклонением для достижения усилия, необходимого для приложения

напряжения к образцу. Контрольный образец суспензии был сравнен с новой суспензией на основе QUIKSET™ при постоянных температуре и влажности.



(a)



(b)



(c)

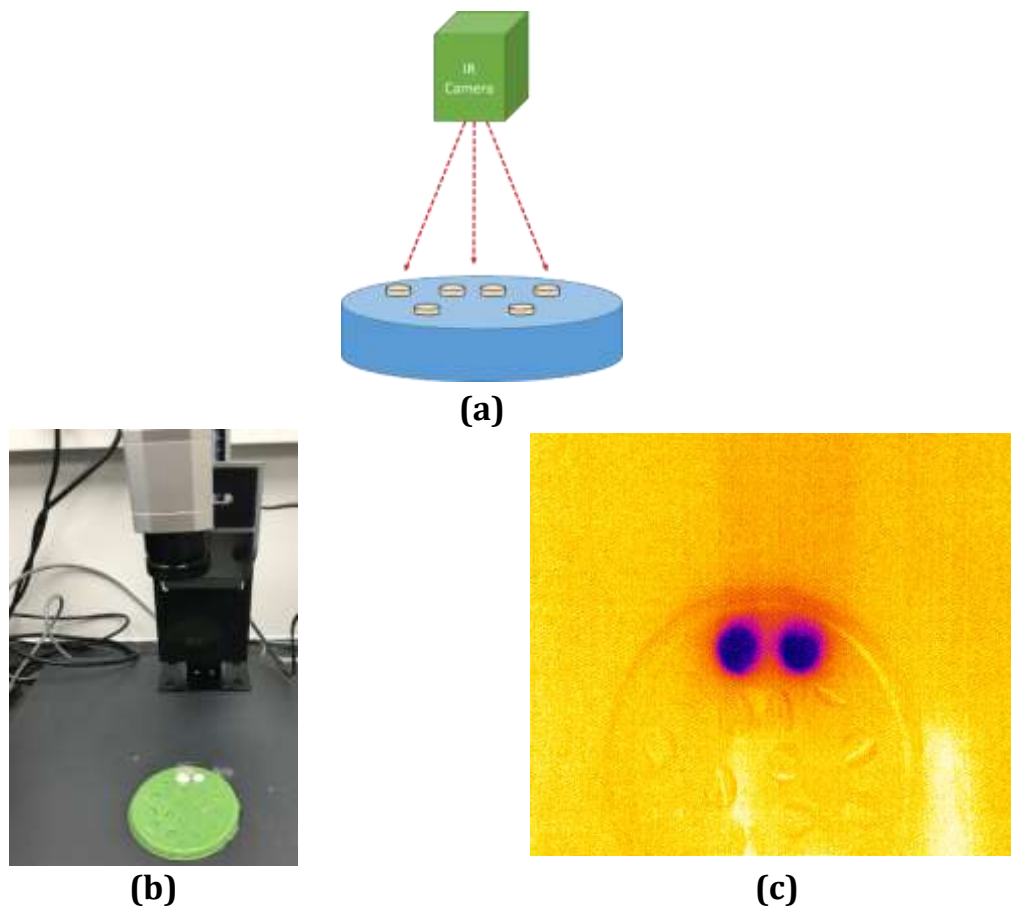
*Рисунок 5 Установка ДМА для оценки желирования суспензии. (а) Схема установки, (б) Изображение установки (с) Образца в держателе установки*

### Анализ ИК-спектра

Разница температур между двумя суспензиями была также вычислена с использованием термического изображения. Образца одинакового объема были помещены на определенную восковую подложку для имитации сушки на восковой модели. Образцы сушились при контролируемых температуре и влажности и при низкой скорости воздушного потока.

С помощью микро-эпсилон термо камеры было получено видеоизображение, а определенной точке каждого образца проводились замеры температуры с

определенным интервалом времени. Затем данные были обработаны в Экселе для наблюдения за изменением температуры в зависимости от времени.

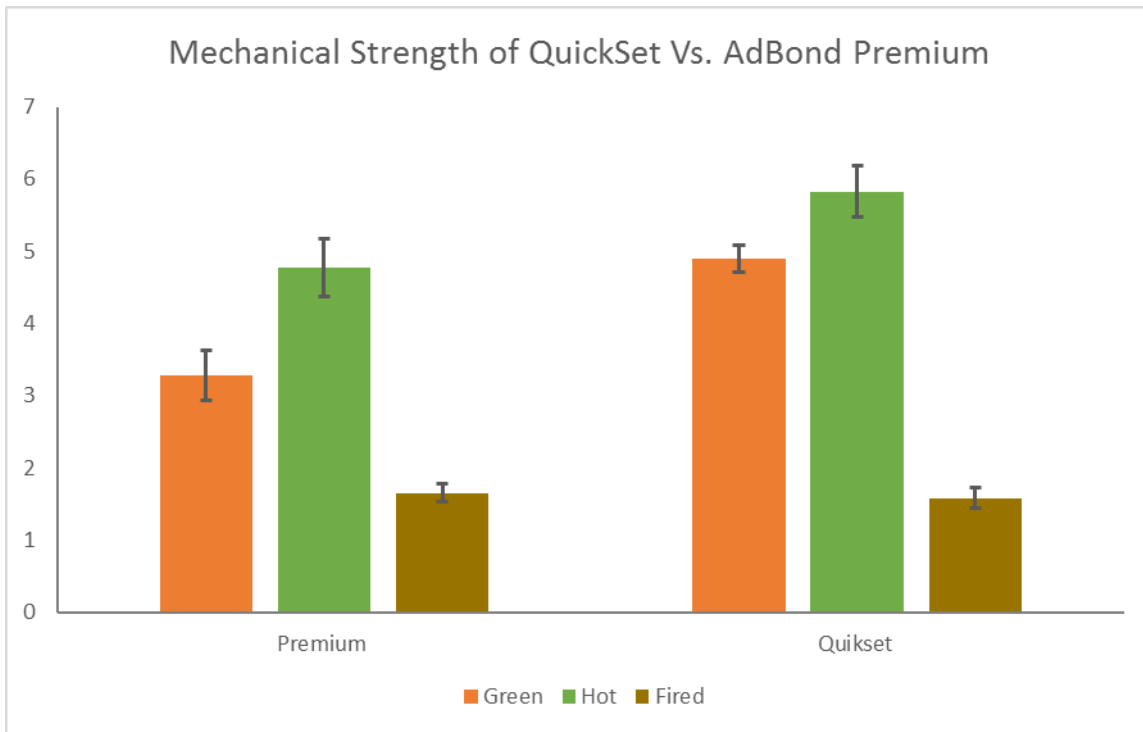


*Рисунок 6 Изображение установки с термо камерой (а) Схематическое изображение (b) Изображение проведения испытания (с) IR изображение сохнущей суспензии*

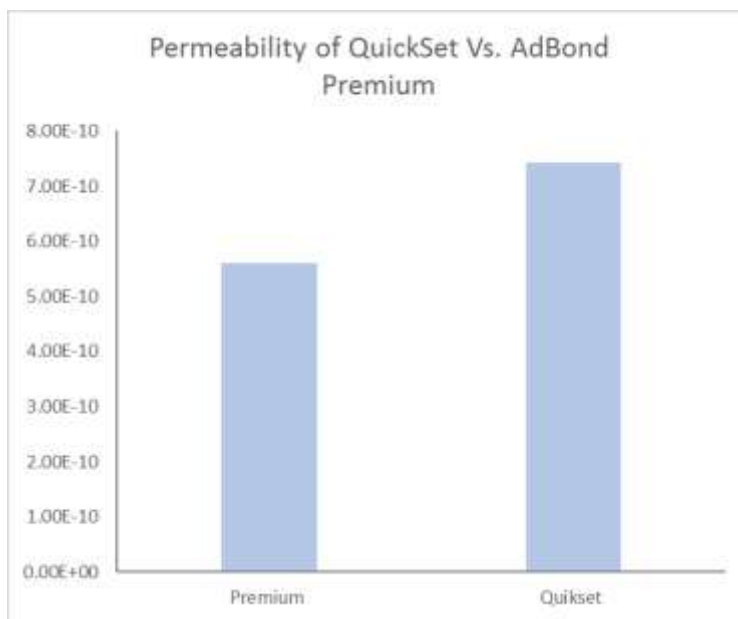
## Результаты и их обсуждение

### Механический анализ

Результаты измерения упругой прочности образцов показаны на рисунке 8.



*Рисунок 7 Упругая прочность (MOR) суспензий RemasolPremium vs. QuikSet [N=4]*



*Рисунок 8 Паропроницаемость суспензий Remasol Premium Vs., измеренная методом теннисного мячика. [n=3]*

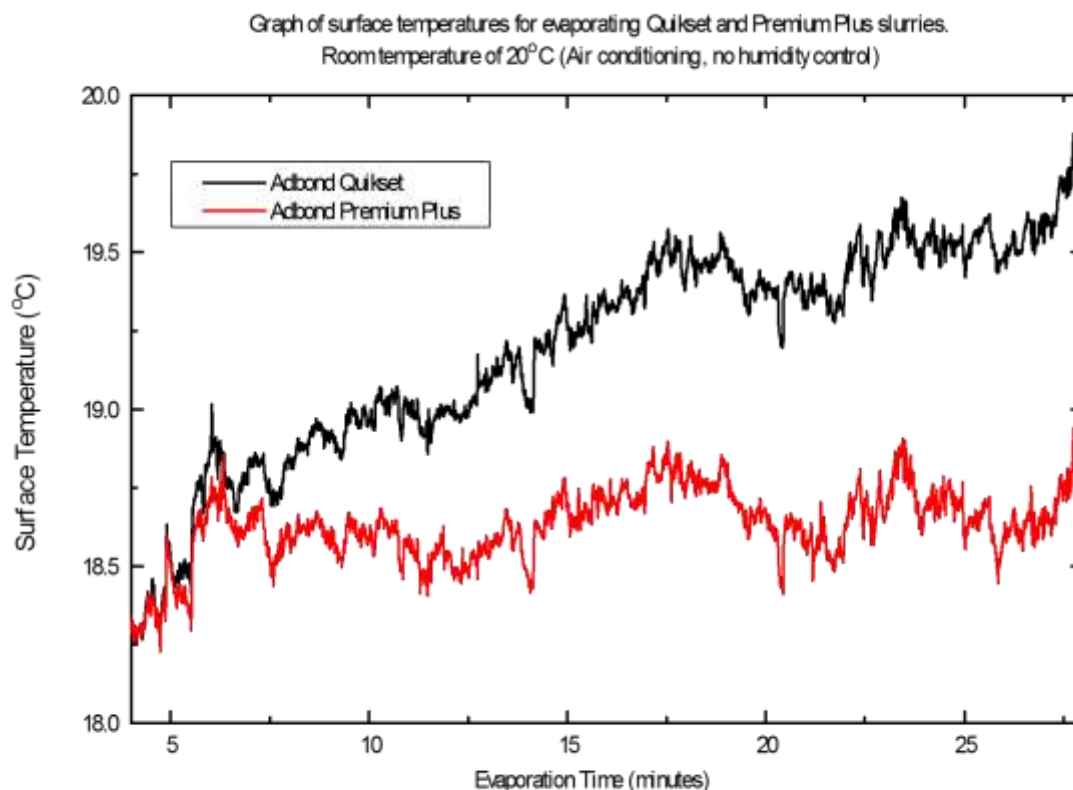
Механические испытания показали, что суспензия QUIKSET™ имеет большие зеленую и горячую прочности на 49 и 22% соответственно в сравнении с

традиционной суспензией. Увеличение прочности затем падает до сравнимых значений после прокаливания и охлаждения для обеспечения легкого извлечения отливки.

Даже с увеличением прочности наблюдается увеличение паропроницаемости на 46%. Это происходит вследствие большего содержания полимера в системе с открытыми порами и улучшения прохождения воздуха через оболочку.

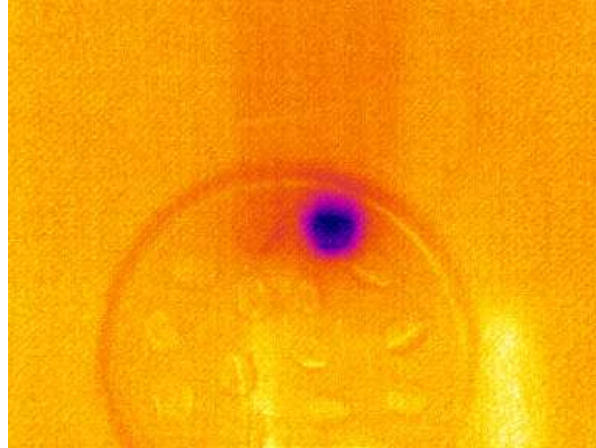
### **Термический анализ**

Термическое изображение способно показать восстановление оболочки в процессе сушки. Термическая камера была с конфигурирована так, чтобы обеспечить считывание температуры с середины образца. Рисунок 10 показывает изменение температуры с течением времени.



*Рисунок 9 График зависимости температуры суспензий QUIKSET™ и Remasol Premium Plus от времени сушки*

Как видно из данного графика, суспензия QUIKSET™ восстановила температуру значительно быстрее в сравнении с традиционной суспензией. Спустя 30 минут между двумя суспензиями была разность температур более 1 градуса. Это показывает, что суспензия QUIKSET™ сохнет быстрее, и температура суспензии быстро восстанавливается до комнатной. Когда суспензия QUIKSET™ была уже сухой на ощупь, суспензия Remasol Premium Plus все еще высыхала, как показано на рисунке 11.

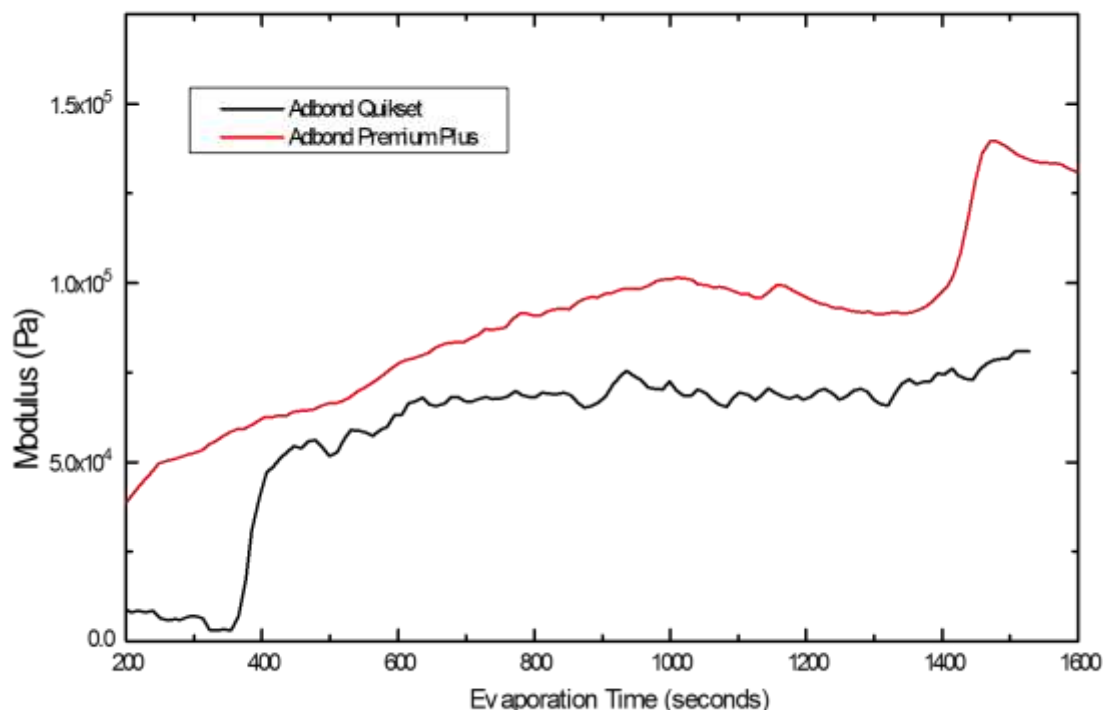


*Рисунок 10 Термическое изображение суспензий после высыхания суспензии QUIKSET™*

### **Динамический механический анализ**

Результаты измерений методом ДМА модуля подложки и желирования суспензии. Было предпринято точное дозирование количества суспензии для обоих образцов. Рисунок 12 показывает модули для суспензий Remasol Premium Plus и QUIKSET™. Данный тест впервые дал возможность механической оценки желирования суспензии. Как можно увидеть ниже, желирование протекает достаточно быстро от одной до двух минут.

Plot of Modulus against evaporation time for Adbond Premium Plus and Adbond Quikset coated on rubber substrate



*Рисунок 11 График зависимости модуля от времени испарения суспензий Remasol Premium Plus и QUIKSET™*

Результаты ДМА показывают медленное увеличение модуля образцов суспензии Remasol Premium Plus в течение медленного высыхания в процессе теста. Затем следует резкое увеличение модуля в процессе желирования.

Для QUIKSET™ желирование происходит гораздо быстрее, чем для Remasol Premium Plus вследствие присутствия нового типа полимера в системе оболочки. Компенсирование желирования происходит гораздо быстрее (на 71%!), чем у традиционной системы. После протекания процесса желирования все еще наблюдается увеличение модуля по мере высыхания суспензии.



## Заключение

Remet разработала применение методики ДМА анализа для оценки желирования суспензий. Увеличение модуля суспензии, нанесенной на каучуковую подложку, можно наблюдать при применении к такому образцу колебательной нагрузки.

Концентрат полимера QUIKSET™ может предложить значительные преимущества на этапе производства керамических оболочек без каких-либо дополнительных инвестиций. При сравнении с другими связующими QUIKSET™ может снизить время сушки, вероятность растрескивания и появления дефектов оболочки в сочетании с улучшенной паропроницаемостью. Присутствие полимера QUIKSET™ делают систему нечувствительной к перепадам влажности и температуры в процессе сушки.

## Список литературы:

- [1] M. Kugelen, *Latest Developments and Trends for Ceramic Shell Building with Water Based Slurries*, in *13th World Conference on Investment Casting*. 2012: Kyoto, Japan.
- [2] N. Chida, *Microwave Drying Furnace Drying the Complex Shaped Molds in Short Time*, in *60th ICI Technical Conference*. 2013: Pittsburgh, PA.
- [3] G. Dooley, *Characterisation Of Rapid Shell Manufacturing System For Improved Lead Times In The Manufacture Of Investment Cast Parts*. 2012: Nashville, TN.
- [4] E E Hellstrom and D S Mc Guire, *A New Generation of Stucco Mixtures to Build Shells Rapidly* in *57th ICI Technical Conference*. 2010: Dearborn

[5] BSI, *Methods of test for Dense shaped refractory products - Part 6: Determination of modulus of rupture at ambient temperature*, in *BS EN 993-6:1995 BS 1902-4.4: 1995*. 1995.

[6] BSI, *Methods of testing Refractory materials - Part 10: Investment casting shell mould systems — Section 10.2: Determination of permeability and standard air flow capacity at elevated temperatures*, in *BS 1902-10.2:1994*. 1994.