

О.Г. Волкова, Л.Б. Жорняк

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА МЕХАНИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СИЛЬНОТОЧНЫХ РАЗРЫВНЫХ КОНТАКТОВ

*Характер взаємодії робочих поверхонь сильнострумних електричних контактів однозначно впливає на їх працездатність. До відмови в роботі контактів в основному приводять процеси, що виникають в результаті комплексу факторів деструктивно впливаючи на їх працездатність. При цьому не всі процеси докладно вивчені і піддаються моделюванню. Одним з істотних чинників, що впливає на роботу контактної пари, служить зусилля стискання контактних поверхонь. Стискання розривних контактів прямо пов'язане з процесами пружної і пластичної деформації контактних матеріалів, що наочно виявляються на контакт-деталях з порошкових або композиційних матеріалів. У статті основна увага приділяється пластичній деформації поверхневих шарів розривних контактів у процесі замикання, оскільки вважається, що вона прямо пов'язана з механізмом провідності контактів. Як показано, істотний вплив на деформацію контактних поверхонь має і робоче середовище, зокрема трансформаторне масло. Оцінка впливу зусилля стиснення на деформацію контактної поверхні проводилася експериментально з використанням методу голографічної інтерферометрії. Наведено результати експериментальних досліджень, в яких вказується, що для компактних і порошкових матеріалах пластична деформація всередині і навколо зони мікроконтактів наводиться спрощено, що вимагає експериментального уточнення. Бібл. 7, табл. 2, рис. 4.*

*Ключові слова:* електричні контакти, контактні поверхні, деформація контактних матеріалів, метод голографічної інтерферометрії.

*Характер взаимодействие рабочих поверхностей сильноточных электрических контактов однозначно влияют на их работоспособность. К отказу в работе контактов в основном приводят процессы, возникающие в результате комплекса факторов деструктивно влияющих на их работоспособность. При этом не все процессы подробно изучены и поддаются моделированию. Одним из существенных факторов, влияющим на работу контактной пары, служит усилие сжатия контактных поверхностей. Сжатие разрывных контактов напрямую связано с процессами упругой и пластической деформации контактных материалов, что особенно наглядно проявляются на контакт-деталях из порошковых или композиционных материалов. В статье основное внимание уделяется пластической деформации поверхностных слоев разрывных контактов в процессе замыкания, поскольку считается, что она напрямую связана с механизмом проводимостью контактов. Как показано, существенное влияние на деформацию контактных поверхностей оказывает и рабочая среда, в частности трансформаторное масло. Оценка влияния усилия сжатия на деформацию контактной поверхности проводилась экспериментально с использованием метода голографической интерферометрии. Приведены результаты исследования, в которых указывалось, что для компактных и порошковых материалов пластическая деформация внутри и вокруг зоны микроконтактов указывается упрощенно, что требует экспериментального уточнения. Библ. 7, табл. 2, рис. 4.*

*Ключевые слова:* электрические контакты, контактные поверхности, деформация контактных материалов, метод голографической интерферометрии.

**Введение.** Механизм проводимости тока через контакты определяется состоянием контактных поверхностей и условиями контактирования. Известно, что усилие сжатия является одним из основных факторов, формирующих характер контактного взаимодействия. Без достаточного усилия сжатия растет переходное сопротивление, или полностью нарушается проводимость контактов. Проводимость пропорциональна усилию сжатия, приводящему вначале к упругой, а затем и к пластической деформации контактных поверхностей. Естественно, что вместе с изменением усилия сжатия, изменяется и внутреннее механическое напряжение в контактном материале. Картина пластической деформации порошковых и композиционных материалов имеет более сложный характер, чем для компактных (литых) материалов и оценка поведения поверхностей контакт-деталей из этих материалов должна опираться на экспериментальные наблюдения, а не упрощенные модели.

**Целью статьи** является демонстрация возможности использования метода голографической интерферометрии для оценки пластической деформации в зоне контактного взаимодействия.

**Моделирование взаимодействия контактных поверхностей.** Экспериментально доказано, что с уменьшением усилия сжатия в 2 раза, переходное

сопротивление контакт-деталей в зависимости от их размеров может увеличиться в 4 и более раз. Для сильноточных контактов существует эмпирическая зависимость [1], показывающая, что переходное сопротивление  $R_{п}$ , в основном, является функцией усилия сжатия, а роль других факторов, например поверхностных пленок – второстепенна и учитывается поправочными коэффициентами:

$$R_{п} = \frac{k \cdot (1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T)}{(0,1 \cdot P_{к})^m}$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $T$  – температура нагрева контакта,  $^\circ\text{C}$ ;  $P_{к}$  – сила сжатия контактов, Н;  $k$ ,  $m$  – коэффициенты, учитывающие материал контактов и характер контактирования.

Желание найти общие закономерности переходного сопротивления от усилия сжатия приводит к моделированию контактных задач на упрощенных моделях. Например, при моделировании контактного взаимодействия в виде сжатия двух упругих сферических поверхностей. Согласно формуле Герца, радиус площадки контактирования такой модели будет равен:

© О.Г. Волкова, Л.Б. Жорняк

$$r = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_K r_{\text{пр}}}{E}}$$

где  $P_K$  – сила сжатия контактов;  $r_{\text{пр}}$  – приведенный радиус кривизны контактных поверхностей;  $E$  – модуль упругости контактных материалов [2].

В этом случае переходное сопротивление может быть выражено формулой

$$R_{\text{п}} = \frac{\varepsilon}{P_K^{1/3}}$$

В диапазоне усилия сжатия от 20 до 500 Н, что характерного для большинства коммутационных устройств, значения эмпирического коэффициента  $\varepsilon$  можно принять следующие: для меди  $47 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{кг}^{1/3}$ ; для латуни  $200 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{кг}^{1/3}$ .

При пластическом характере контактного взаимодействия, когда радиус площадки смятия определяется уравнением

$$r = \sqrt{\frac{P_K}{\pi \sigma_{\text{см}}}}$$

где  $\sigma_{\text{см}}$  – временное сопротивление смятию контактных материалов, то переходное сопротивление контакта оценивается как [2]

$$R_{\text{п}} = \frac{k}{P_K^{1/2}}$$

где коэффициент  $k$  для некоторых видов контактных материалов представлен в табл. 1.

Таблица 1

Свойства контактных материалов

Материалы контактов	Коэффициент $k$ для силовых контактов, Ом кг <sup>1/2</sup>
Медь	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Серебро	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Латунь	$6,7 \cdot 10^{-4}$
Сталь	$7,6 \cdot 10^{-4}$

Соотношение между приложенной нагрузкой и фактической площадью контакта может быть представлено как

$$P_{\text{К1}} = \zeta \cdot H \cdot A_i,$$

где  $1/3 \leq \zeta \leq 1$  – коэффициент, учитывающий упругую составляющую деформации контактных поверхностей;  $H$  – твердость контактных материалов с учетом температуры;  $A_i$  – площадь фактического контакта.

Руководствуясь подобными моделями, контактную задачу на ЭВМ решают численными методами с одновременной оценкой зон контактного взаимодействия с упругой и пластической деформацией.

Существуют пакеты программ, позволяющие моделировать эти процессы и обеспечить их контроль. Таким требованиям во многом отвечают пакеты программ для конечно-элементного анализа (например ANSYS), которые в последнее время широко используются в расчетах различных механических конструкций.

Общий подход к решению задач контактного взаимодействия твердых поверхностей сводится к поэтапной реализации следующих базовых шагов расчета [3]:

1. Создание твердотельных объектов, которые отображают геометрию замыкаемых контактов, и их сеточное разбиение.

2. Установление контактной пары.

3. Назначение целевой и контактной поверхностей, элементы которых связаны между собой физическими постоянными и позволяют учесть кинематику контактной деформации.

4. Установление ключевых опций элементов и реальных постоянных контактирующих поверхностей.

5. Определение движения жесткой контактной поверхности.

6. Задание необходимых граничных условий.

7. Задание опций силового нагружения и решения задачи.

8. Решение контактной задачи.

9. Анализ результатов.

В качестве примера может быть рассмотрена двумерная картина контактного взаимодействия главных контактов контактора РПН типа КНОА 110/1000. На рис. 1 представлены элементы контактной пары в виде замкнутых упругопластических тел, покрытых сеткой конечных элементов (КЭ).

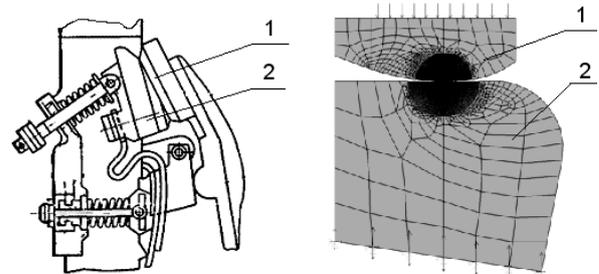


Рис. 1. Пример использования конечно-элементного анализа для изучения взаимодействия контактных пар:

1 – подвижный контакт; 2 – неподвижный контакт

Внедрение таких методик при условии стабильности механических свойств контактных поверхностей, позволит решать контактные задачи оперативно и с большей точностью. Однако при оценке влияния силы сжатия необходимо учитывать механические характеристики контактных материалов (при рабочих температурах), конфигурацию и микрогеометрию контактирующих поверхностей, а также механические и адгезионные свойства поверхностных пленок и др. Такое количество факторов позволяет утверждать, что аналитическим путем нельзя установить общую закономерность для усилия сжатия, гарантирующего оптимальную работу контактов [4].

**Экспериментальное определение деформации контактной поверхности.** Методы моделирования не позволяют достаточно полно учитывать реальный характер взаимодействия контакт-деталей при длительной эксплуатации, в силу развития деструктивных процессов на их поверхностях. Это не только экранирующее действие поверхностных пленок, влияние которых хорошо известно [5], но и пластическая деформация поверхности контактов. Причиной этому может служить завышенное значение силы сжатия контактных поверхностей, электротермические процессы, а также пластифицирующий эффект окружающей среды, например трансформаторного масла.

В целом, деформация поверхностного слоя имеет сложный механизм, поскольку пластичный контактный материал способен не только растекаться, но и внедряться в тело контакта. Под действием усилия сжатия изменяется и внутреннее механическое напряжение в контактном материале. Усилие сжатия, устанавливаемое в значениях максимально возможных для конкретной контактной пары, не только улучшает проводимость, но и приводит к деформации и разрушению контактных поверхностей при эксплуатации, а, следовательно, снижает их работоспособность.

Особенно наглядно эти процессы проявляются в контактных парах из порошковых и композиционных материалов. Широкое применение многокомпонентных порошковых материалов для разрывных контактов в силовых коммутационных устройствах является обычной практикой. Работа таких материалов вызывает интерес в силу их специфического поведения, что требует более подробного изучения.

Многокомпонентные порошковые и композиционные материалы, как правило, обладают достаточно высокой прочностью, что объясняется наличием каркасной структуры. Рассмотрим это на примере контактного материала КМК-Б20, применяемого для силовых контактов в контакторах РПН (рис. 2).

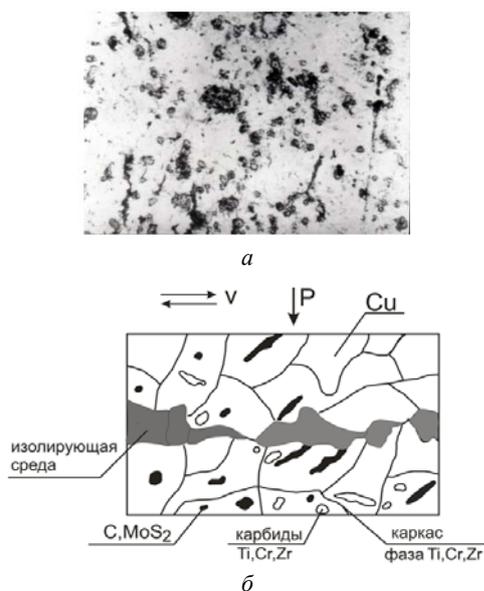


Рис.2. Структура многокомпонентного порошкового материала (а) и модель контактной поверхности (б)

Каркас, состоящий из твердых соединений на основе W, Ni или Ti, Cr, Zr воспринимает основную механическую нагрузку от усилия сжатия и смещения, что стабилизирует величину деформации внутри материала и на контактной поверхности. Для улучшения антифрикционности и обеспечения значений твердостей контактной пары в состав материала вводят твердые смазки в виде дисульфида молибдена, графита и ряда других. Пластичная электропроводная основа (медь) порошкового материала во многом разгружается от приложения усилия сжатия и усилия смещения, а ее только объемы, прилегающие к зоне непосредственного контакта, испытывают напряженное состояние.

Кроме диссипации механической энергии вследствие сжатия и трения контактных поверхностей при переключении, происходит и накопление остаточных напряжений на площадках фактического контакта [6]. Вследствие случайности формы и размеров шероховатостей, а также их местоположения на поверхности трения, остаточные напряжения случайным образом распределяются по поверхности и во времени. Существенную роль при этом играет и пористость структуры. Если на одних участках в данный момент времени идет накопление внутренней энергии (упругая деформация), то на других этот процесс может, достигнув максимума затухать с выделением тепла или образованием очагов разрушения. Область повышенной пластичности в общем случае, совпадает с областью наибольших механических напряжений, т.е. с центральной областью площадки касания. После многократных циклов замыкания-размыкания контактов создаются предпосылки для зарождения трещин, приводящие к разрушению рабочих поверхностей контактной пары. Наличие стохастически расположенной в порошковой структуре пористости проявляется трещинами разрушения и податливостью в зоне контактирования.

Отклонения в поведении поверхностей контактов из компактных и порошковых материалов, можно наблюдать на модели контактной пары в конструкции РПН типа РНТА 35/320. Для сравнения материалами подвижных контактов были выбраны медь М1 и порошковый материал КМК-Б20. Материалом неподвижного контакта в обоих случаях была латунь ЛС59-1.

В эксперименте была использована методика исследования контактного взаимодействия твердых тел с помощью голографической интерферометрии, позволяющая регистрировать вектор смещения точек приконтактной области путем двойной экспозиции объекта наблюдения при освещении источником когерентного излучения.

В процессе эксперимента контакты закреплялись в опорной призме с нагружающим устройством и являлись объектом съемки в голографической схеме, как показано на рис. 3. Первоначально проводилась съемка контактов на пластинку в ненагруженном состоянии. В дальнейшем проводится повторное экспонирование нагруженных контактов силами сжатия  $P$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$  на ту же фотопластинку.

Если полученную таким образом дважды экспонированную голограмму осветить копией опорной волны, то наблюдается голографическое изображение контактной пары с наложением сетки интерференционных полос. Полосы локализованы как на объекте съемки, так и на прилегающей к нему зоне. Фотокопии таких голограмм представлены на рис. 4.

Количественная оценка деформации контактной поверхности проводилась путем отслеживания отклонения интерференционных полос от так называемой полосы нулевого порядка. В нашем случае интерференционная полоса нулевого порядка определяется как единственная, не изменяющая своего положения при двойном экспонировании. Визуально это определяется как максимально яркая полоса на интерферограмме [7].

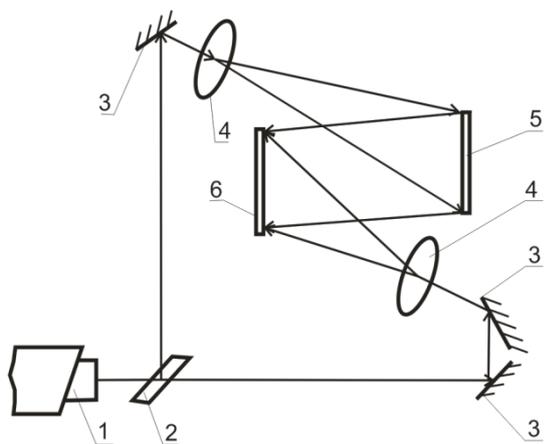


Рис. 3. Схема голографического интерферометрирования по методу двойной экспозиции: 1 – лазер ЛГ-38; 2 – делитель; 3 – зеркало; 4 – линза; 5 – объект; 6 – фотопластинка

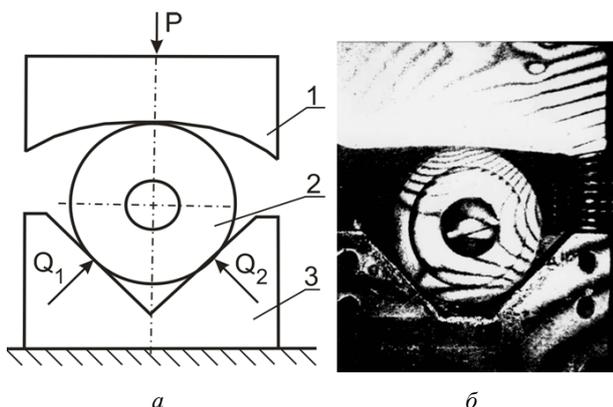


Рис. 4. Схема нагружения (а) и голограмма контактной пары (б): 1, 2 – неподвижный и подвижный контакты; 3 – опорная призма

Определение деформации проводилось по снимкам с учетом положение интерференционной полосы нулевого порядка и вектора перемещения направленного перпендикулярно поверхности контактирования. Различие в податливости участков контактных поверхностей хорошо заметно по количеству полос интерференции. Чем теснее их сетка, тем больше перемещение. На это наглядно указывает разница полос на стальной призме и на контакте.

Расчет перемещения контактной поверхности сводился к умножению порядкового номера интерференционного максимума на численное значение длины волны источника излучения (в нашем случае 0,3162 мкм). Условно обозначив на снимке порядковыми номерами светлые полосы, определяли смещение по формуле

$$Z(x) = \frac{N\lambda}{2}$$

где  $Z(x)$  – перемещение, мкм;  $N$  – число полос;  $\lambda$  – длина волны, мкм.

Изучение перемещений контактной поверхности проводилось в статическом режиме. В процессе эксперимента силу  $P$  изменяли ступенчато в диапазоне изменения силы сжатия контактов реального устройства. При этом была возможность в зону контактирования подавать трансформаторное масло, что имити-

ровало условия работы контактов в маслonaполненных коммутационных устройствах. Данные, полученные в результате использования следующей методики, представлены в табл. 2.

Таблица 2  
Максимальные перемещения контактных поверхностей при различных условиях нагружения, мкм

Материал	Нагрузка $P$ , Н			Твердость НВ
	1300	2700	4000	
М1	0,632/1,264*	1,264/3,160*	4,100/8,010*	100-110
КМК-Б20	0,630/1,900*	1,900/6,320*	4,480/8,220*	120-150

\*присутствие трансформаторного масла в зоне контакта

По результатам эксперимента видно, что сравнение степени деформации контактных поверхностей из компактных (литых) и порошковых материалов по критерию их твердости не достаточно корректно, поскольку на деформацию контактной поверхности большое влияние оказывают неоднородность структуры и пористость порошковых материалов.

Данным методом возможно определять предельную нагрузку для контактных материалов не прибегая к их разрушению, а также прогнозировать поведения контактов при длительной эксплуатации.

#### Выводы.

1. Методом голографической интерферометрии возможно исследовать взаимодействие поверхностей разрывных контактов сильноточных коммутационных устройств. Экспериментально полученные результаты дают более точную картину деформации контактной поверхности с учетом множества факторов, которые нельзя учесть при моделировании.

2. Обнаружено влияние на деформацию контактных поверхностей внешней среды в маслonaполненных коммутационных устройствах, которая при больших нагрузках более чем в два раза увеличивает перемещение контактной поверхности без видимых повреждений при сжатии.

3. Использование экспериментального метода определения перемещения приконтактной области позволяет оптимизировать работу разрывных контактов из композиционных и порошковых материалов. Например, установлено, что для контактора РПН РНТА 35/320 усилие сжатия не должно превышать 4060 Н, а максимальная деформация контактной поверхности значений 8-11 мкм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таев И.С. Электрические аппараты управления. – М.: Высшая школа, 1984. – 243 с.
2. Буткевич Г.В. Основы теории электрических аппаратов. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. – М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
4. Мерл В. Электрический контакт. Теория и применение на практике. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 82 с.
5. Мышкин Н.К. Электрические контакты. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 560 с.
6. Кашеев В.Н. Процессы трения в зоне фрикционного контакта металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 211 с.

7. Гинзбург В.М., Степанова Б.М. Голография. Методы и аппаратура. – М.: Советское радио, 1974. – 376 с.

#### REFERENCES

1. Taev I.S. *Elektricheskie apparaty upravleniia* [Electrical control apparatus]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1984. 243 p. (Rus).
2. Butkevich G.V. *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov* [Basic theory of electrical apparatus]. Moscow, Vysshiaia shkola Publ., 1970. 600 p. (Rus).
3. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and tasks]. Moscow, Komp'iuter Press Publ., 2002. 224 p. (Rus).
4. Merl V. *Elektricheskii kontakt. Teoriia i primeneniie na praktike* [Electrical contact. Theory and practical application]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 82 p. (Rus).
5. Myshkin N.K. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Dolgoprudnyi, Intellect Publ., 2008. 560 p. (Rus).
6. Kashcheev V.N. *Protsessy treniia v zone friktsionnogo kontakta metallov* [Friction process in metal contact frictional zone]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 211 p. (Rus).
7. Ginzburg V.M., Stepanova B.M. *Golografiia. Metodyiapparatura* [Holography. Methods and equipments]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 376 p. (Rus).

Поступила (received) 22.10.2015

Волкова Ольга Григорьевна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
Жорняк Людмила Борисовна<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет,  
69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64,  
тел/phone +380 6127 698304,  
e-mail: volkova@zntu.edu.ua

O.G. Volkova<sup>1</sup>, L.B. Zhornyak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zaporozhye National Technical University,  
64, Zhukovsky Str., Zaporozhye, 69063, Ukraine.

#### Investigation of high-current interrupting contacts working surfaces mechanical interaction nature.

**Introduction.** The nature of the interaction of high-working surfaces of the electrical contact uniquely affects their performance. By the failure of the contacts in the main drive processes resulting from complex destructive factors affecting their performance. However, not all processes are studied in detail and give in modeling. **The purpose** of the paper is to show the possibility of using the method of holographic interferometry to estimate the plastic deformation in the zone of contact interaction. One of the significant factors affecting the work of the contact pair is the compressive force of the contact surfaces. Compression discontinuous contact is directly connected with the processes of elastic and plastic deformation of the contact material, which is particularly evident in the contact details of the powder or composite materials. The paper focuses on the plastic deformation of the surface layers of discontinuous contact in circuit, it is believed that it is directly related to the mechanism of conductivity of contacts. As shown, a significant effect on the deformation of the contact surfaces and renders the working environment, in particular transformer oil. **Methodology.** Assessing the impact of compression forces on the deformation of the contact surface was conducted experimentally using the method of holographic interferometry. **Results.** Experimental studies, which indicated that the compact and powder materials plastic deformation in and around the area microcontacts simplistically stated that requires experimental verification. A method for evaluating the state of stress, which affects the formation and destruction of the local contact spots. **Practical value.** Using the experimental method of determining the movement of the contact region allows you to optimize discontinuous contacts from composite and powder materials. References 7, tables 2, figures 4.

**Key words:** electrical contacts, contact surfaces, deformation of contact materials, method of holographic interferometry.