

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО
КОРДА ОТ РЕЗИНЫ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫШЕК**

**APPLICATION OF HIGH- FREQUENCY HEATING FOR THE SEPARATION OF METAL CORD
FROM RUBBER IN THE RECYCLING OF THE TIRES**

*(Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический Университет)
(St. Petersburg State Electrotechnical University)*

*Межотраслевая лаборатория современных электротехнологий (МОЛСЭТ)
Interindustrial laboratory of modern electrotechnologies (ILME)*

Тихомиров Илья Сергеевич,
кандидат технических наук, младший научный сотрудник

I. Tihomirov,
candidate of technical sciences, junior researcher

Фадеев Алексей Алексеевич,
младший научный сотрудник

A. Fadeev,
junior researcher

Ключевые слова: переработка шин, овалный индуктор, высокочастотный нагрев.

Keywords: tire recycling, oval inductor, high-frequency heating.

Аннотация: В статье предложено использовать высокочастотный нагрев для отделения металлического корда от резины при утилизации автомобильных покрышек. Рассмотрены два вида индукторов: овалный и петлевой. Описан эксперимент по нагреву металлического корда.

Abstract: We propose to use high-frequency heating for the separation of metal cord from rubber in the recycling of the tires. Two types of inductors: oval and loop are considered. An experiment on the heating of the metal cord is described.

Количество автомобилей на нашей планете растёт с каждым днём. Одновременно с этим идёт непрерывное накопление изношенных автомобильных шин.

По данным сайта <http://best-china.ru>, переработке подвергаются лишь 20% отслуживших покрышек. Закопанная в землю шина будет разлагаться больше 120 лет, выделяя при этом вещества, смертельно опасные для человека и окружающей среды. При сжигании покрышки выделяются газы и сажа, которые засоряют атмосферу. В тоже время, правильно переработанные шины могут служить источником сырья для производства асфальтобетонной смеси, гидроизоляции, строительных материалов, например, таких как спортивные покрытия и резиновый шифер. Таким образом, переработка и вторичное использование отработавших шин имеет важное экономическое и экологическое значение.

В настоящее время в Санкт-Петербургском Государственном Электротехническом Университете в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 г. проводится научно-исследовательская работа по созданию индукционного нагревательного оборудования для отделения металлического корда от резины при утилизации автомобильных покрышек.

Рассмотрим подробнее, как устроена автомобильная покрышка. По данным, взятым с интернет сайтов <http://www.vwmotors.ru>, <http://www.pokrishka.ru>, <http://autosistema.ru> шина состоит из семи основных частей рис. 1.

1. Протектор из каучука – обеспечивает надёжное сцепление шины с дорожным полотном.
2. Бандаж из покрытого каучуком нейлона, улучшает способность шины выдерживать высокие скорости, а также способствует точности изготовления шины.
3. Два слоя стального корда (внешний и внутренний) – каждый представляет собой ряд жгутов сплетённых из двух или более стальных проволок, диаметр которых составляет 0.3 мм. Корд предназначен для сохранения формы шины, а также для повышения устойчивости автомобиля.
4. Внутренний слой из бутилкаучука – служит препятствием для выхода воздуха из внутреннего пространства шины.
5. Бортовые полосы – изготовлены из природного каучука и предназначены для защиты шины от боковых повреждений и внешних воздействий.
6. Защита бортовой закраины.

7. Кольцевой стержень – сделан из стальной проволоки. Служит для надёжного закрепления шины на колёсном диске.

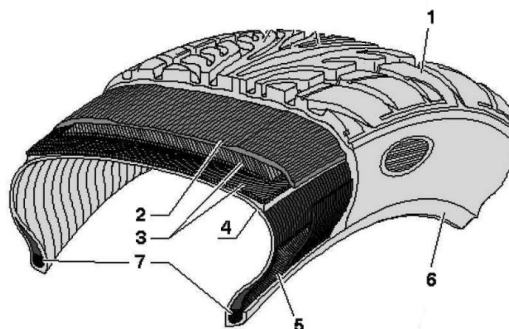


Рис. 1. Поперечный разрез радиальной бескамерной шины легкового автомобиля

Одним из ключевых этапов переработки покрышек является отделение резины и текстиля от металлического корда. Существующие технологии утилизации покрышек подразумевают механическое измельчение шин с последующим отделением металлических включений в магнитном сепараторе или устройстве типа «циклон». Основными недостатками такого способа являются:

1. невозможность полного сепарирования металлических включений и резиновой крошки, что снижает качество получаемого продукта;
2. увеличение износа измельчающего оборудования.

В данной статье предлагается для повышения качественных и эксплуатационных показателей существующих технологических процессов по переработке автомобильных покрышек дополнить их этапом высокочастотного нагрева.

На начальном этапе переработки необходимо разделить покрышку на три части, т.е. отделить бортовые поверхности от протекторной части. Затем бортовые и протекторную части шины нужно разрезать для того чтобы их можно было пропустить через индуктор. Проходя через индуктор, металлический корд будет нагреваться и отслаиваться от резины и текстиля.

После такой операции ускорится измельчение покрышки, так как связь между металлическим кордом и резиной будет разрушена, уменьшится износ измельчающего оборудования, увеличится чистота магнитной сепарации и, следовательно, повысится качество получаемого продукта.

Рассмотрим два варианта индукторов, которые можно применять для нагрева кордов автомобильных шин. Первый вариант – овалный индуктор с продольным магнитным полем рис. 2 (а). Валки предназначены для протягивания покрышки через индуктор. Второй вариант – петлевой индуктор с поперечным магнитным полем рис. 1 (б). Применение этого индуктора позволит проводить технологический процесс не разрезая протекторную и бортовые части покрышки.

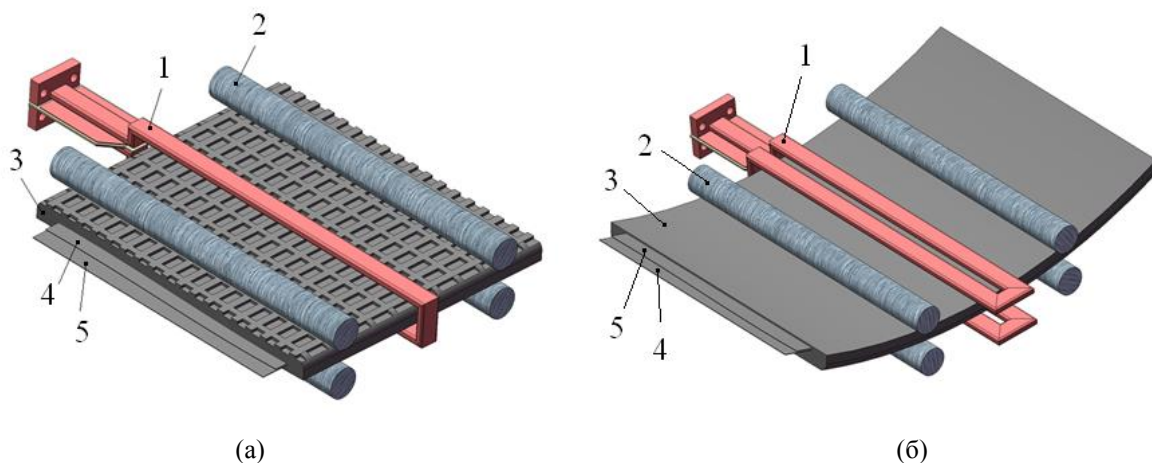


Рис. 2. Индукционные системы на основе овалного индуктора (а) и петлевого индуктора (б) (1 – индуктор, 2 – валки для протягивания, 3 – протекторная часть покрышки, 4 – внешний слой корда, 5 – внутренний слой корда)

Для оценки энергетических параметров индукционных систем было проведено компьютерное моделирование в программе FEMM 4.2. Двумерные модели индукционных систем с овалным индуктором и петлевым индуктором показаны на рис. 3. Индукторы выполнены из профилированной медной трубки

20x7.5 мм с толщиной стенки 1.5 мм. Высота окна индукторов равна 30 мм. Расстояние между слоями корда 1 мм, зазор между внешним слоем и индуктором составляет (воздух 5 мм + резина 15.4 мм = 20.4 мм), а между внутренним слоем и индуктором (воздух 5 мм + резина 2.4 мм = 7.4 мм). Размер сетки магнитопровода равен 0.3 мм, размер сетки индуктора и стального корда равен 0.1 мм. При расчётах в качестве материала корда была взята сталь 20. Ток индуктора подбирался так, чтобы мощность, которая выделяется в детали, была одинакова для обоих индукторов. Частота тока равна 66 кГц. При моделировании было принято следующее допущение: каждый слой автомобильного корда заменён цельной стальной полосой толщиной 0.6 мм. После решения электромагнитной задачи были получены следующие результаты (таблица 1).

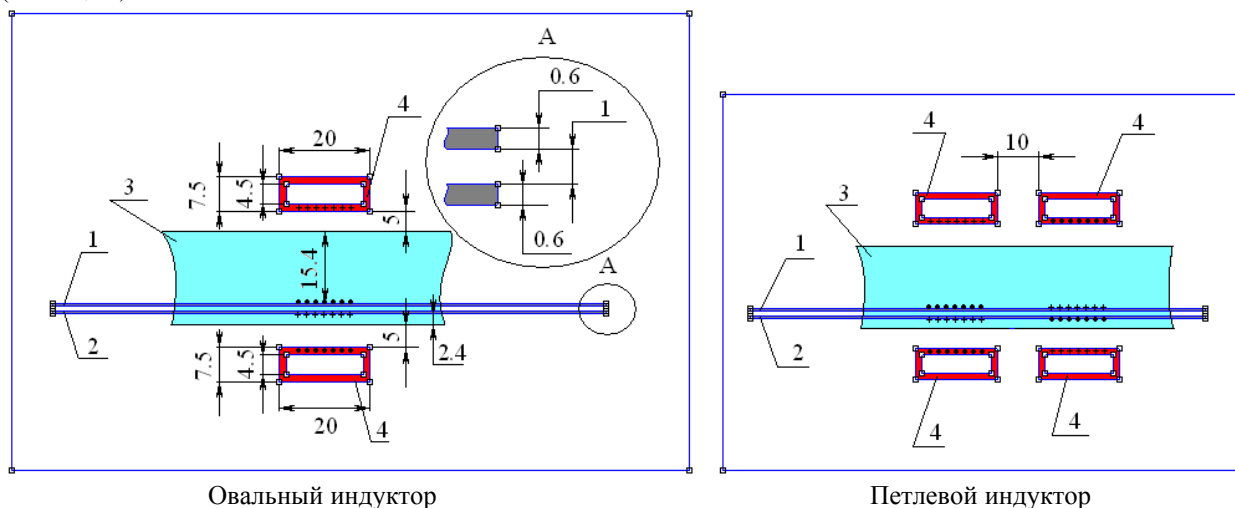


Рис. 3. Двумерные компьютерные модели индукционных систем (1 – внешний слой корда (ширина 240 мм), 2 – внутренний слой корда (ширина 240 мм), 3 – резина, 4 - индуктор)

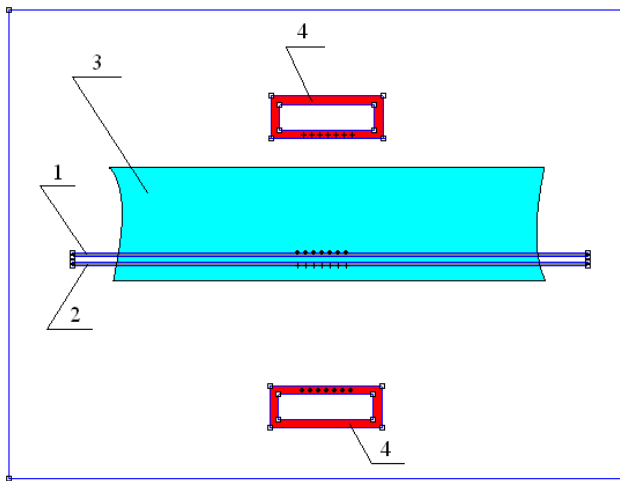
Таблица 1: Результаты компьютерного моделирования

Тип индуктора	$P_{\text{внеш.}}$ кВт	$P_{\text{внут.}}$ кВт	$P_{\text{дет.}}$ кВт	$P_{\text{инд.}}$ кВт	КПД %	$I_{\text{инд.}}$ А	$G_{\text{экв.}}$ Ом	$L_{\text{экв.}}$ мкГн
Овальный	7.531	12.722	20.303	1.801	92	1400	0.0116	0.171
Петлевой	5.049	15.106	20.155	6.343	76	1680	0.0096	0.227

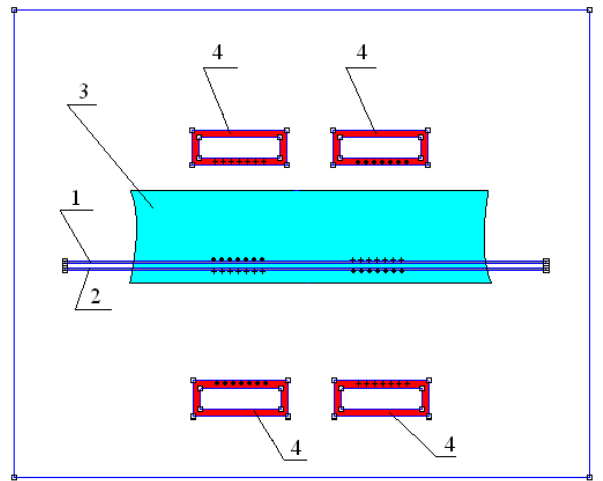
$P_{\text{внеш.}}$ – мощность выделяемая во внешнем слое корда, $P_{\text{внут.}}$ - мощность выделяемая во внутреннем слое корда, $P_{\text{дет.}}$ – суммарная мощность, выделяемая в корде, $P_{\text{инд.}}$ – мощность выделяемая в индукторе, $I_{\text{инд.}}$ – ток индуктора, $G_{\text{экв.}}$ – эквивалентное сопротивление индукционной системы, $L_{\text{экв.}}$ – эквивалентная индуктивность индукционной системы, КПД – коэффициент полезного действия индуктора. С точки зрения КПД овального индуктора оказывается предпочтительнее петлевого индуктора.

Из-за разного зазора между индуктором и внешним и внутренним слоями корда в них выделяется разная мощность $P_{\text{внеш.}} < P_{\text{внут.}}$. При таких конструкциях индукторов для достижения требуемого значения температуры внешнего слоя придётся увеличивать время нагрева, это приведёт к перегреву внутреннего слоя и может вызвать возгорание покрышки.

Равномерного нагрева можно добиться следующими способами. Первый – сделать зазоры между индуктором и слоями корда одинаковыми. Для этого необходимо увеличить зазор между индуктором и внутренним слоем на 13 мм. Второй – установить магнитопровод на часть индуктора, которая греет внешний слой корда. Для определения наиболее эффективного способа были сделаны расчёты на компьютерных моделях рис. 4 и рис. 5. Результаты компьютерного моделирования сведены в таблицу 2.

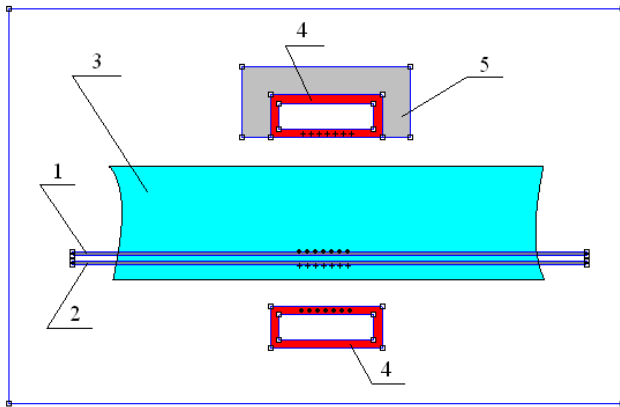


Овальный индуктор

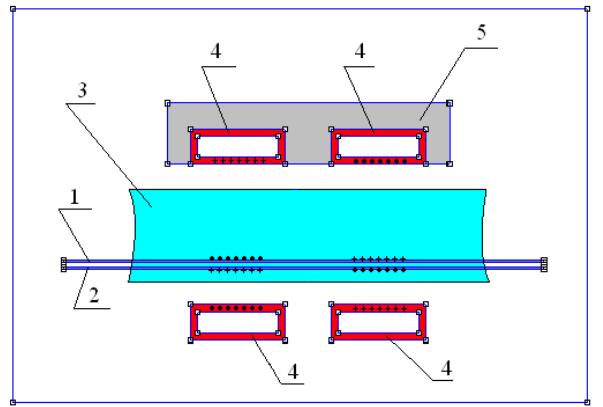


Петлевой индуктор

Рис. 4. Двумерные компьютерные модели индукционных систем с одинаковым зазором (1 – внешний слой корда, 2 – внутренний слой корда, 3 – резина, 4 – индуктор)



Овальный индуктор



Петлевой индуктор

Рис. 5. Двумерные компьютерные модели индукционных систем с магнитопроводом (1 – внешний слой корда, 2 – внутренний слой корда, 3 – резина, 4 – индуктор, 5 - магнитопровод)

Таблица 2: Результаты компьютерного моделирования

Тип индуктора	$P_{\text{внеш. кВт}}$	$P_{\text{внут. кВт}}$	$P_{\text{дет. кВт}}$	$P_{\text{инд. кВт}}$	КПД %	$I_{\text{инд. А}}$	$\Gamma_{\text{ЭКВ. Ом}}$	$L_{\text{ЭКВ. мкГн}}$
Овальный с одинаковым зазором	10.121	10.152	20.273	2.663	88	1700	0.0082	0.198
Петлевой с одинаковым зазором	10.411	10.471	20.882	17.174	55	2700	0.052	0.241
Овальный с магнитопроводом	10.7	9.449	20.15	2.458	89	1150	0.0177	0.275
Петлевой с магнитопроводом	10.52	9.536	20.056	6.599	75	1260	0.0173	0.444

При увеличении зазора между индуктором и деталью снижается КПД индукционной системы, однако таким способом легче добиться равномерного нагрева внутреннего и внешнего слоёв корда.

Для повышения КПД индукторов с одинаковым зазором можно установить на них магнитопровод. Результаты расчётов на компьютерных моделях для индукторов с одинаковым зазором и магнитопроводом рис. 6 сведены в таблицу 3.

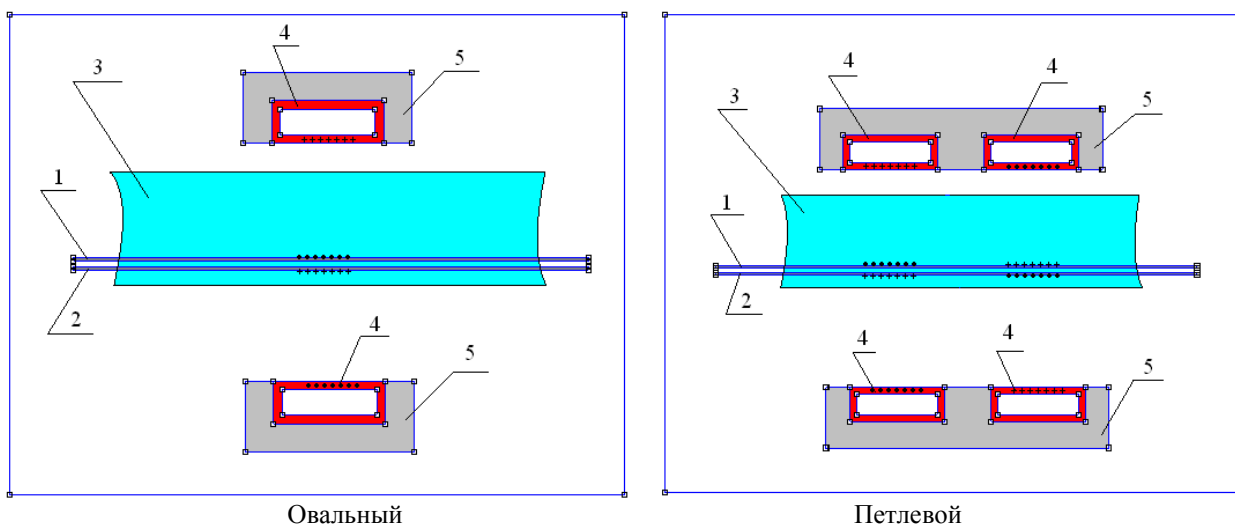


Рис. 6. Двумерные компьютерные модели индукционных систем с одинаковым зазором и магнитопроводом (1 – внешний слой корда, 2 – внутренний слой корда, 3 – резина, 4 – индуктор, 5 - магнитопровод)

Таблица 3: Результаты компьютерного моделирования

Тип индуктора	$R_{\text{внеш. кВт}}$	$R_{\text{внут. кВт}}$	$R_{\text{дет. кВт}}$	$R_{\text{инд. кВт}}$	КПД %	$I_{\text{инд. А}}$	$G_{\text{экв. Ом}}$	$L_{\text{экв. мкГн}}$
Овальный с одинаковым зазором и магнитопроводом	10.062	9.962	20.024	3.384	86	1100	0.0198	0.401
Петлевой с одинаковым зазором и магнитопроводом	10.131	10.205	20.338	9.228	69	1230	0.02	0.668

Наиболее оптимальным с точки зрения КПД и равномерности нагрева, является овальный индуктор с минимальными зазорами и магнитопроводом, установленным на часть индуктора, которая греет внешний слой корда. Внешний вид этой индукционной системы представлен на рис. 7.

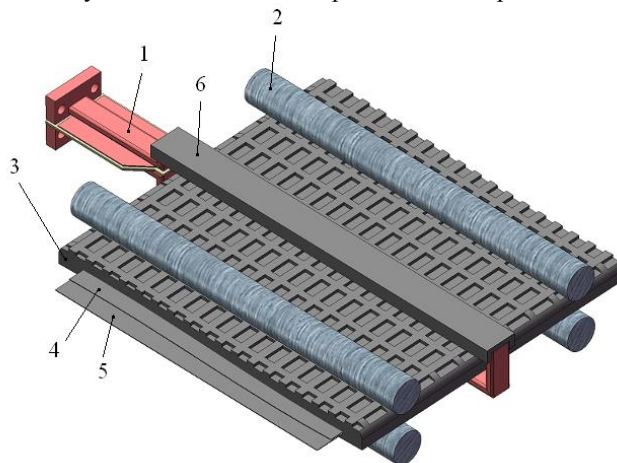


Рис. 7. Индукционная система на основе овального индуктора с магнитопроводом (1 – индуктор, 2 – валки для протягивания, 3 – протекторная часть покрывки, 4 – внешний слой корда, 5 – внутренний слой корда, 6 - магнитопровод)

Для проверки предположений об отслоении стального корда от резины и текстиля при нагреве, правильности выбранного частотного диапазона и сравнения реальных параметров индукционной системы с полученными при компьютерном моделировании, был проведён эксперимент. В качестве источника питания использовался преобразователь частоты мощностью 35 кВт, с рабочим частотным диапазоном 50 – 100 кГц. Индуктор выполнен из профилированной медной трубки сечением 20x7.5 мм с толщиной стенки

1.5 мм. Окно индуктора равно 3000x30 мм. На часть индуктора, которая греет внешний слой автомобильного корда, установлен магнитопровод, выполненный из феррита 2500НМС1. Нагреваемым объектом является часть автомобильной покрышки шириной 285 мм, ширина автомобильного корда при этом составляет 240 мм. Для согласования параметров источника питания и индукционной системы использовался блок согласования, состоящий из понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 27 и компенсирующего конденсатора ёмкостью 40 мкФ, установленного последовательно с индуктором на низкой стороне трансформатора. Параметры согласующего устройства определялись исходя из параметров индукционной системы полученных при компьютерном моделировании (см. таблицу 2 строка 3 $r_{\text{ЭКВ}} = 0.0177 \text{ Ом}$, $L_{\text{ЭКВ}} = 0.275 \text{ мкГн}$). Нагрев проводился без движения нагреваемого объекта. Фото индукционной системы и согласующего устройства представлены на рис. 8.



Рис. 8. (а) индукционная система на основе овального индуктора, (б) индукционная система и согласующее устройство

При нагреве входная мощность источника питания находилась на уровне 5 кВт, ток индуктора 410 А, частота тока была равна 45 кГц. Процесс тления резины (400 – 600°C), сопровождающийся дымообразованием, начинался примерно через 2 – 3 с после включения нагрева. На рис. 9 представлены фото среза автомобильной покрышки до и после нагрева.



Рис. 9. Фото срезов автомобильной покрышки (а) до нагрева, (б) после нагрева

После нагрева происходит отслоение металлического корда от резины и текстиля. В выбранном частотном диапазоне нагрев корда проходит эффективно до температуры Кюри (800°C), дальнейшее увеличение температуры для данной технологии не требуется. По экспериментальным данным были определены параметры индукционной системы. Эквивалентное активное сопротивление $r_{\text{ЭКВ}} = 0.029 \text{ Ом}$, эквивалентная индуктивность $L_{\text{ЭКВ}} = 0.349 \text{ мкГн}$. Полученные результаты отличаются от расчётных (см. таблицу 2 строка 3), это связано с тем, что при моделировании корд был заменён плоской шиной, также может не соответствовать материал корда. Разработанная упрощённая двумерная модель подходит для определения параметров согласующих устройств. Для получения более точных результатов необходимых для оптимизации индукционной системы правильнее будет применять более сложное программное обеспечение позволяющее работать с трёхмерными моделями.

На примере покрышки с типоразмером 285/60/R18 (внешний диаметр 799 мм, ширина протекторной части 285 мм, ширина стального корда 240 мм) оценим производительность установки с транзисторным источником ТГИ40 (мощностью 35 кВт, частотный диапазон 50 – 100 кГц). Примерный вес стального корда можно определить по следующей формуле:

$$G = \rho \cdot V = \rho \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4} \cdot \pi D \cdot \frac{l}{d} \cdot 4 \right) = \rho \cdot \pi^2 \cdot D \cdot l \cdot d \quad (1)$$

где $D \approx 799 \text{ мм} = 0.799 \text{ м}$ – внешний диаметр покрышки; $l \approx 240 \text{ мм} = 0.24 \text{ м}$ – ширина стального корда; $d = 0.3 \text{ мм} = 0.0003 \text{ м}$ – диаметр стальной проволоки, из которой изготовлен корд; $\rho = 7.7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали.

$$G = 7.7 \cdot 10^3 \cdot 3.14^2 \cdot 0.799 \cdot 0.24 \cdot 0.0003 = 4.4 \text{ [кг]}$$

Энергия, необходимая для нагрева рассчитывается по формуле:

$$W = c \cdot G \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

где $c = 0.46 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$ – удельная теплоёмкость стали, $t_1 \approx 20^\circ\text{C}$ – начальная температура объекта, $t_2 \approx 600^\circ\text{C}$ – температура тления резины.

$$W = 0.46 \cdot 4.4 \cdot (600 - 20) = 1173.92 \text{ [кДж]}$$

Время нагрева одной покрышки определим по формуле:

$$t = \frac{W}{P_{ист} \cdot \eta_{инд}} \quad (3)$$

где $P_{ист}$ – номинальная мощность источника питания [кВт], $\eta_{инд}$ – КПД индукционной системы (для выбранного нами варианта индуктора $\eta_{инд} = 0.89$ (см. таблицу 2, строка 3)).

$$t = \frac{1173.92}{35 \cdot 0.89} \approx 38 \text{ [с]}$$

Таким образом, при выходной мощности источника питания в 35 кВт можно прогревать одну покрышку типоразмера 285/60/R18 примерно за 38 с. После этапа высокочастотного нагрева разрушается связь между резиной и металлическим кордом. Это должно ускорить процесс механического измельчения покрышки и снизить износ измельчающего оборудования.

Список литературы

1. Установки индукционного нагрева: Учебное пособие для вузов/А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунер; Под ред. А. Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981.- 328 с., ил.
2. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. - 264 с.