

**Крашевски Цезар, IBDiM**  
**Краевски Марек, Lafarge Kruszywa**  
**Сыбильски Дариуш, IBDiM**  
**Олейник Януш, Lafarge Kruszywa**

## **СТАБИЛИЗАЦИОННЫЕ ЩЕБЕНОЧНЫЕ СМЕСИ НЕПРЕРЫВНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

### **1. Введение**

Развитие дорожной отрасли во многих странах является важнейшим фактором экономического развития и движущей силой развивающихся стран. Постоянно увеличивающийся доступ к современной технологии, оборудованию, а также к современным методам управления, приводит к быстрому обмену технической мыслью и устанавливает более тесное сотрудничество между научными центрами. Вместе с развитием дорожной технологии велись поиски более экономных решений, позволяющих при ограниченных затратах строить быстро хорошие по качеству и прочные дороги.

Одним из важнейших элементов дорожной конструкции является основание. Оно выполняет роль «фундамента», а важно, чтобы этот элемент был соответственно стойким и прочным, а используемые материалы не повышали стоимости дороги. Применяемые с 90-х годов смеси непрерывного гранулометрического состава в основаниях стабилизированных механическим способом, гарантируют получение высокого уровня предельной нагрузки конструкции, при низких затратах исполнения.

### **2. Немного истории**

В послевоенной Польше, восстановление страны главным образом было связано с восстановлением инфраструктуры, в том числе также дорожной. Первые, механически стабилизированные основания так называемые «щебёнки» описаны в норме 1960 года PN-60/S-96023 [1], которая частично определяла способ исполнения щебеночного основания. Стандартизированный способ исполнения механически стабилизированного основания был

применяем несколько последующих десятилетий. Упрощая предел нормы можно сказать, что исполнитель дороги был обязан к:

1. уложению нижнего слоя основания толщиной от 12 до 20 см, с горного материала, допустимым была сниженная прочность материалов применяемых в основании,
2. к уплотнению слоя основания, употребляли щебень 60÷80 мм или 40÷60 мм горных пород класс I. Слой уплотнялся катком, тяжестью ок. 6 тонн,
3. вторым слоем основания толщиной 11÷12 см (после уплотнения) был щебень 60÷80 мм или 40÷60 мм горного материала класс I. Повторно уплотнялось данный слой 6-тонным катком, употребляя воду. Суть утрамбовки слоя заключалась в том, чтобы перед катком «не образовывалась волна»,
4. третий, так называемый верхний слой основания, толщиной от 5 до 11 см, опять укладывали из крупного щебня, а затем уплотняли зернами щебня о каменного отсева при помощи 13-ти тонного катка, применяя при этом воду.

Это были многослойные основания, требующие больших затрат энергии на уплотнение - основания типа MACADAM.

Слой уплотненного щебня толщиной от 28 по 43 см мог применяться как верхний слой основания дорожного покрытия, при слабом движении, так и как основание под асфальтные слои при большей нагрузке при интенсивном движении. Норма отличала два вида испытаний:

1. Во время строительства, между прочим: качество применяемых материалов, проверка толщины укладки и уплотнения подкладки или нижнего щебневого слоя (путем визуального осмотра), а также плотность и связность поверхности.

2. Испытания во время приёмки поверхности, между прочим,: конструкции поверхности, разбирая «подозрительные» места, проверяя их плотность и связность (путем осмотра).

Возникающие проблемы при производстве такого типа оснований - это, прежде всего, большая проблема с необходимым уплотнением отдельных слоёв материала, субъективная оценка проведенных работ, а также большой участие оборудования для проведения выше указанных работ.

Выше указанная норма [1] от 1960 года была обновлена в 1984 году, а затем введено норму PN-84/S-96023 [2]. Она допускала применение щебня 31,5÷63 мм класс III, клинца 20÷31,5 мм или дробленой смеси 20÷63 мм, чтобы заклинить фракцию 4÷20 мм и мелко гранулированную крошку 0,075÷4 мм. Строительство дороги должно происходить по следующей схеме:

1) укладка щебня фракции 31,5÷63 мм, без уплотнения и клинования,

2) затем укладка верхнего слоя щебеночного основания или клинца фракции 20÷31,5 мм. Слой этот был заклинен щебнем фракции 4÷20 мм и отсевом фракции 0,075÷4 мм.

Эти слои, также как и в случае нормы с 1960 года, могли быть верхний слоем дорожного покрытия при низкой интенсивности движения или основанием под асфальтные либо бетонные слои. Минимальная толщина слоёв после уплотнения не могла быть меньше чем 7 см, однако практически, при средней и тяжёлой интенсивности движения вводятся слои не меньше чем 20 см, которые согласно норме укладывались в двух слоях. Способ уплотнения слоёв, вид применяемых машин, норма оставляла для исполнителя. Сфера нормы расширилась в области проводимых испытаний поверхности по отношению к норме 1960 года. Ликвидировалась субъективность оценки через введение ряд новых испытаний, начиная от проверки свойств употреблённых материалов, через проверку параметров толщины слоёв, оканчивая на проверке устойчивости структуры против распадов либо определения упругости.

Тот же способ строения основания, требовал не менее двухкратного уплотнения отдельных слоёв, что приводило к проблемам по показателям плотности, а затем также предельной нагрузки конструкции. Слой щебня и клинца вмещает большое количество свободных пространств между фракциями. Такое состояние вызвано малым количеством мелкого щебня, который мог бы приводить к заклинению и стабилизации целого слоя. Применяемый поверхностно слой отсева 0÷4 мм давал уплотнение только для части основания.

Как уже вспоминалось в начале, в 90-е годы почти совсем отказались от применения щебеночных оснований согласно PN-84/S-96023 [2], и их заменили на механически стабилизированные

основания согласно норме PN-S-06102:1997 [6]. На практике это означало использование применения оснований из смесей непрерывного гранулометрического состава. Перед нормой PN-S-06102:1997 существовала норма 1964 года BN-64/88933-02 [3]. Это была отраслевая норма, т.е. норма с ограниченной сферой применения, которая впервые показывала хорошее гранулометрическое поле щебня.

### **3. Механическая стабилизация - требования смеси непрерывного гранулометрического состава, а также технологический процесс строительства**

Механическая стабилизация - исправление показателей грунта или щебня, получаемая в процессе уплотнения. Суть уплотнения заключается в лучшем распределении зерна, что влияет на уменьшение содержания свободного пространства - пустоты. Гранулометричность смеси (крошки) должна быть подобрана таким образом, чтобы получить минимальное количество пустого пространства. Для того, чтобы получить достаточное уплотнение при довольно низкой энергии, всеобщее применяются так называемые смеси оптимального гранулометрического состава и податливые на уплотнение. Податливость на уплотнение зависит от формы кривой гранулометричности грунта. Для грунта согласно [4, 5] принято, что он хорошо уплотняется при показатель однородности гранулометричности составляет  $C_u > 5$ .

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad [1]$$

$d_{60}$  - диаметр частиц, которых вместе с меньшими в грунте есть 60 % массы.

$d_{10}$  - диаметр частиц, которых вместе с меньшими есть в грунте 10 % массы.

В случае со щебнем, уровень показателя  $C_u$  должен составлять от 30 по 60. Уплотнение Загущение щебня зависит, прежде всего, от формы кривой гранулометричности. Гранулометричность должна быть непрерывной, а состав последующих фракций соответствующий, в таком виде, чтобы кривая просева находилась

в требуемых границах. Для этого в нормах и спецификациях подаются и рекомендуются границы гранулометричности.

Ниже указан раздел гранулометричности для щебня (крошки) к применяемому в Польше дорожным основаниям согласно [6].

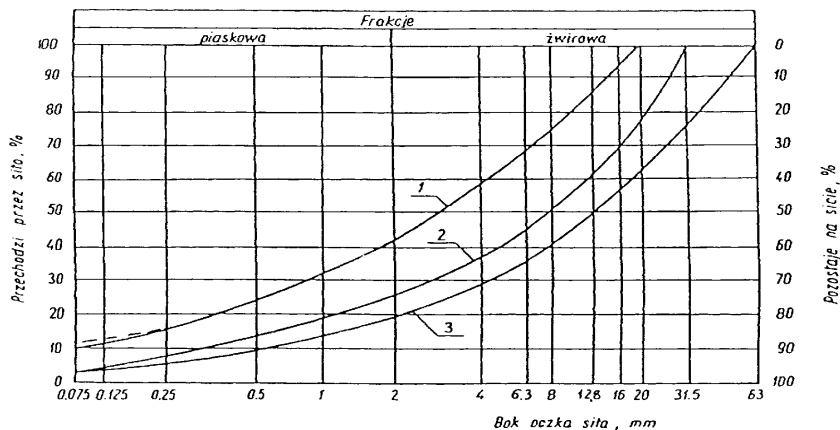


Рисунок 1 - Поле хорошей гранулометрии щебня предназначенного на основание выполненное методом механической стабилизации:  
 1-2 - материал на верхний слой либо основание однослойное;  
 1-3 - материал на нижний слой основания

На рис. 1 видно что выступают два вида смесей: мелкая 0/31,5 мм, рекомендуемая для верхних слоев основания, а также крупная 0/63 мм для применения в нижних слоях. Надо обратить внимание на содержание пыли. Она ограничена до максимального уровня 10÷12%. Увеличенное количество мелких частиц приводят к потере стабильности после насыщения водой, а также повышает пучинистость смеси. Непрерывной гравнулометрический состав, обладающий хорошей оптимальной гранулометричностью, приводит к тому, что смесь хорошо уплотняется и обретает высокую стабильность на  $w_{пoл}$  (CBR)=80÷120%.

Принята в Польше в 2004 г новая норма PN EN 13285 [7] расширяет пределы гранулометричности смесей с 0/8 мм до 0/80 мм, что позволит увеличить используемый ассортимент щебня, который до сих пор редко применялся. Это касается мелких фракций, которые отсеивались во время производства. Новая норма

PN EN 13285 является нормой продуктов, без технологических элементов производимых работ, а также без требований для слоёв оснований. Эта норма в скоро заменит польскую норму PN-S-06102:1997, но только после разработки Апликационного Документа, в котором будут указаны польские требования. В настоящий момент идёт работа над созданием этого Документа.

Кроме гранулометричности, материалы должны обладать соответствующими механическими показателями так как указано на таблице 1. Сырьём к производству смесей непрерывного гранулометрического состава по [6] могут быть: природные крошки, природные ломаные крошки, доменный шлак, а также их смеси. Норма PN EN 13285 [7] предлагает совершенно новый подход к сырью, предлагает применять более широкую гамму материалов, также производственные отходы (доменный шлак, горные сланцы), а также маткриалы полученные путем рециклинга (бетонные крошки).

**Таблица 1** - Характеристики материалов используемых в производстве смесей постоянной гранулометрии согласно [6]

№.	Характеристики	Требования					
		Природные мат		Дробленые мат		Шлаки	
		Основание					
		Главная (верхья)	Вспомогательная (нижня)	Главная (верхья)	Вспомогательная (нижня)	Главная (верхья)	Вспомогательная (нижня)
1	Содержание зерен менее 0,075 mm, % (m/m)	2 ÷ 10	2 ÷ 12	2 ÷ 10	2 ÷ 12	2 ÷ 10	2 ÷ 12
2	Содержание, % (m/m), nie więcej niż	5	10	5	10	5	10
3	Содержание зерен пластинчатой формы, %, (m/m), не более	35	45	35	40	-	-
4	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % (m/m не более, чем)	1	1	1	1	1	1

№.	Характеристики	Требования					
		Природные мат		Дробленые мат		Шлаки	
		Основание					
		Главная (верхняя)	Вспомога- тельная (нижняя)	Главная (верхняя)	Вспомога- тельная (нижняя)	Главная (верхняя)	Вспомога- тельная (нижняя)
5	Показатель песка по 5-кратному уплотнению методом I lub II согл. PN-B-04481, %	35÷70	35÷70	35÷70	35÷70	-	-
6	Истираемость в барабане Los Angeles а) истираемость полная по полному числу оборотов, не более, чем б) истираемость частичная по 1/5 полного числа оборотов, не более чем	35	45	35	50	40	50
		30	40	30	35	30	35
7	Водостойкость, % (m/m), не более чем	2,5	4	3	5	6	8
8	Морозостойкость, потеря массы по 25 циклах заморозки, % (m/m), не более чем	5	10	5	10	5	10
9	Распад кремния и железа вместе, % (m/m), не более чем	-	-	-	-	1	3
10	Содержание соединений серы в перерасчете на SO <sub>3</sub> , % (m/m), не более чем	1	1	1	1	2	4
11	Показатель устойчивости против распада $w_{nos}$ смеси, %, не менее, чем: а) при уплотнении $I_S \geq 1,00$ б) при уплотнении $I_S \geq 1,03$	80	60	80	60	80	60
		120	-	120	-	120	-

Технологический процесс производства оснований из смесей непрерывного гранулометрического состава аналогичен строительству щебеночных оснований, с той разницей, что оптимальная смесь не требует заклинки, она более восприимчивая на уплотнение и может быть применена в одном слое. Уложенную смесь сначала уплотняют вибрационным катком, чтобы получить предварительное уплотнение, а затем катком без вибрации, лучше резиновый. Толщина уплотненной смеси не может превышать 25 см и не может быть тоньше 10 см. В случае превышения размеров слоёв, рекомендуется строительство двухслойных оснований. Наилучшим способом укладки смеси непрерывного гранулометрического состава является укладчик, который даёт возможность уложить слои одинаковой толщины, но можно применять также бульдозер и разравниватель, обращая внимание на потерю влажности и рассортировку крошки.

Смесь непрерывного гранулометрического состава должна обладать определённым количеством влаги так, называемой оптимальной влажностью, *w<sub>opt</sub>* определяемой пробой Проктором. Влажность позволяет получить необходимое уплотнение смеси при низкой энергии уплотнения. Надо добавить, что смесь должна транспортироваться строительный участок во влажном состоянии, что не позволит на ее рассортировку. Оптимальная влажность для смесей непрерывного гранулометрического состава в зависимости от вида сырья равняется составляет от 6÷12%.

Основания из смесей непрерывного гранулометрического состава должны строиться на грунтах или на слоях соответствующих условиям непроницаемости частиц, так как указано ниже:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} \leq 5 \quad [2]$$

где:  $D_{15}$  - размер отверстия сита, через которое проходит 15 % зерен слоя основания, в мм

$d_{85}$  - размер отверстия сита, через которое проходит 85 % зерен грунта, в мм

В случае не соответствия этого условия, должны применяться посредние слои из крошек либо из геосинтетиков (геоткань или геоволокно).



В процессе производимых работ проверяются: грануляция и влажность смеси, а также уплотнение основания. Если проверка грануляции и влажности является стандартным процессом, и происходит без каких-либо проблем, то традиционная проверка уплотнения является не приемлемой. Поэтому применяется косвенный способ испытания с помощью нагрузки плитой согл. [8]. Измерением уплотнения является отношение вторичного модуля деформации  $E_2$  к первоначальному модулю  $E_1$ . Отношение не должно быть выше чем 2.2. Кроме этого уплотненное основание должно обладать соответствующей стабильностью так как указано в таблице 2.

**Таблица 2** - Характеристики уплотненного основания согл. [6]

Основание из щебня с показателем (CBR) не меньшим чем, %	Требуемые характеристики основания		
	Показатель уплотнения $I_s$ не меньший чем	Минимальный показатель деформации $MPa$	
		при первом напряжении $E_1$	при втором напряжении $E_2$
60	1,0	60	120
80	1,0	80	140
120	1,03	100	180

#### 4. Производство смесей непрерывного гранулометрического состава

Производителю щебня, легче производить смеси непрерывного гранулометрического состава  $0 \div 31,5$  мм и  $0 \div 63$  мм, чем крошки более узких фракций. Имея ввиду объём данного реферата, производственный процесс будет оговорен на примере дробленых крошек. В Польше применяются три способа производства смесей для основам дорожной одежды. Самым популярным способом является получение смеси прямо из производства, второй применяя оборудование образующее кривую грануляции в отдельных фракциях или путём смешивания готовых фракций. Все три способа на первом этапе производственного процесса выглядят

одинаково. Подготовка к производству смеси непрерывного гранулометрического состава должна начинаться с оценки сырья, как перед так и после взрыва. Надо обратить особое внимание на содержание илистых фракций. Слишком большое количество мелких фракций (илистых и пыльных) влияет на снижение параметра песчаного показателя SE в готовом продукте, что влияет на пучистость материала. К производству смесей непрерывного гранулометрического состава может применяться сырьё не самого лучшего качества, снижение требований физических показателей готового продукта, дают производителю возможность утилизации недоброкачественных скал. После взрыва и оценки, сырьё переходит в первую степень дробления (обычно щековая дробилка), в следующем процесс может происходить по одному из трёх указанных выше вариантов:

### **1. Вариант**

После предварительного дробления, полупродукт проходит на грохот (вид грохота зависит от следующих этапов производства), там на верхнем сите (нпр. # 33 (65) мм) просеиваются зёрна выше 31,5 (63) мм. Отсеянные зёрна проходят на вторую степень дробления (нпр. производство мелкого щебня), затем просеянный материал, который является готовым продуктом - получается смесью непрерывного гранулометрического состава 0÷31,5 (63) мм. Затем если в готовом продукте выступает слишком большое количество пыли, на грохоте необходимо установить дополнительное сито, с помощью которого удалялось пылевидная фракция (<0,075 мм) или песчаных (<2 мм).

### **2. Вариант**

После вступительного дробления, полупродукт проходит на другую степень дробления (нпр. Ударная или конусная дробилка), затем на двух трехрусных грохотах рассеивается на соответствующие щебеночные фракции нпр. в Lafarge Kruszywa Sp. z o. o. - фракции 0÷5 мм, 5÷8 мм, 8÷16 мм, 16÷25 мм и 25÷31,5 (63) мм. Готовые щебеночные фракции через ссыпной литник подаются в соответствующем процентном отношении как компонент готовой смеси. Ленточные транспортеры подают полупродукты в смешивающий барабан, где соответствующие фракции смешиваются и после опорожнения барабана и подачи на

склад, получают готовый продукт приготовленный к продаже - смесь непрерывного гранулометрического состава  $0 \div 31,5$  (63) мм.

### **3. Вариант**

Следующим вариантом производства смесей непрерывного гранулометрического состава является производство смеси из готовых продуктов. Полупродукт проходит через установленный у производителя производственный процесс, в котором получают готовые продукты с узкими фракциями. Производитель должен так подобрать пропорции готовых продуктов, чтобы можно было сложить смесь непрерывного гранулометрического состава. После подготовки соответствующих пропорций смеси, последует смешивание в специально подготовленном смесителе или с помощью тяжёлого оснащения нпр. многократное пересыпание погрузчиком.

Кроме параметров соответствующих показателей готового продукта, в производственном процессе выступает ещё один очень важный элемент. Несмотря на выбор производственного варианта, готовый продукт при складировании на призму и транспортировке на строительный участок, обладает тенденцией к россегрегации, т.е. разделение фракций мелких и крупных (проблемы при уплотнении при укладке).

Есть несколько способов на то, чтобы не допустить до сепарации фракций, одним из них является применение специальных автоматических литников на транспортерах, подающих готовые продукты на призму для складирования. Управляемый инфракрасным излучением литник, автоматически устанавливается, не смотря на количество складываемого продукта, приблизительно 15 см над верхушкой отвала для складирования. Другим элементом является обучение рабочего персонала, принимающего участие при погрузке смесей и определением способом загрузки машин.

С экономической точки зрения, процесс подготовки смеси непрерывного гранулометрического состава, является полезным как для производителя щебня, так и для строителя дорог. Ниже прилагается ориентировочный расчет затрат производства смеси, который базируется на средних кривых грануляции для типичных фракций [6].

**Таблица 3** - Финансовые расчеты производства смеси

Фракция щебня	Процентное содержание в составе 0 - 31,5 mm	Средняя стоимость щебня (в UAH)	Содержание в стоимости смеси 0-31,5 mm (w UAH)
Отсев 0 - 5 mm	45%	7,00	3,15
Щебень 5 - 20 mm	32%	23,40	7,48
Щебень 20 - 40 mm	23%	18,70	4,30
Сумма	100%		14,93
Затраты по смешению с исп. Погрузчика			2,00
Сумма			16,93

Строитель дороги получает затем готовый продукт по низшим ценам, чем при традиционном подходе, т.е. щебеночно - клинцевых оснований.

### **5. Примеры типичных дорожных конструкций с применением щебня (крошки) непрерывного гранулометрического состава согласно польских Каталогов Дорожных Поверхностей**

Основания непрерывного гранулометрического состава могут применяться в податливых конструкциях (асфальтных), а также и в жёстких (бетонных). Польские каталоги дорожных поверхностей предусматривают применение оснований непрерывного гранулометрического состава [9,10]. Существует правило (принцип), смеси с природных крошек (не дробленые) могут применяться в вспомогательных слоях (морозостойкие слои, усилительные) или в виде оснований для конструкции с небольшой нагрузкой. Смеси дробленые могут применяться в верхних и нижних слоях, предназначенных под большие нагрузки. В Польше выступает 6 категорий нагрузки движения: KR1÷KR6.

Категория KR1 обозначает до 12 расчётных осей 100 кN/ось/сутки, а KR6 свыше 2000 расчётных осей 100 кN/ось/сутки. В зависимости от предусмотренной нагрузки движения Польские каталоги предусматривают применение оснований из смесей непрерывного гранулометрического состава на разных уровнях конструкций, так как указано на рисунке 2. Можно заметить, что для категории KR1 и KR2 Каталог [10] допускает применение крупногабаритных щебеночных оснований, а для высших категорий должны быть основания из дробленых материалов непрерывного гранулометрического состава. Основания из смесей непрерывного гранулометрического состава являются также хорошим решением на ограничение разрывов (пучинистости) исходящих из твердых слоев (худой бетон либо грунт стабилизированный цементом) к асфальтным слоям. Они также выполняют роль перепонки, которая задерживает прохождение разрывов слоев расположенных выше.

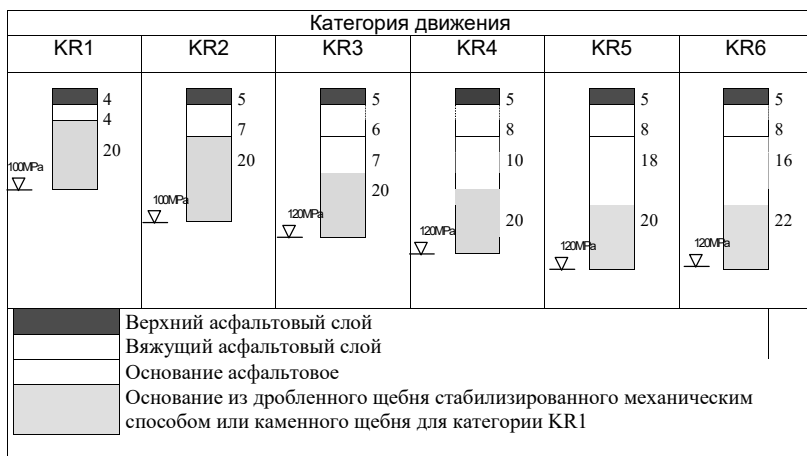


Рисунок 2 - Пример податливых конструкций с основанием из дробленой смеси непрерывного гранулометрического состава [10]

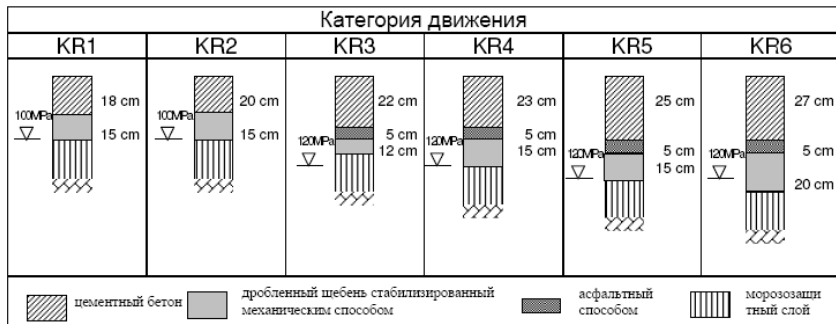


Рисунок 3 - Пример податливых конструкций с основанием из дробленой смеси непрерывного гранулометрического состава согл [9]

## Выводы

Предоставленные в реферате анализы приводят к следующим выводам:

- смеси непрерывного гранулометрического состава являются материалом обладающим очень хорошей степенью уплотнения;
- хорошая уплотняемость позволяет минимализировать энергию на уплотнение, что влияет на уменьшение удела дорожного оборудования;
- основания из смесей непрерывного гранулометрического состава могут быть укладываться в одом слою толщиной до 25 см в одном технологическом цикле (размещение смеси и уплотнение);
- смеси непрерывного гранулометрического состава могут быть изготовлены из разных компонентов, включая материалы происходящие в результате *рециклинга*, промышленные материалы из отходов, нпр. металлургические шлаки
- затраты производства смесей непрерывного гранулометрического состава ниже, чем при производстве узкофракционного щебня.

## **Литература**

1. **PN-60/S-96023** Nawierzchnie tłuczniowe.
2. **PN-84/S-96023** Podbudowa i nawierzchnia z tłucznia kamiennego.
3. **BN-64/88933-02** Drogi samochodowe. Podbudowa z kruszywa stabilizowanego mechanicznie
4. **Z. WIŁUN** Zarys geotechniki. WKiŁ Warszawa 1987 r.
5. **PN-S-02205:1998** Drogi samochodowe. Roboty ziemne.
6. **PN-S-06102:1997** Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie.
7. **PN EN 13285** Unbound mixtures - Specification.
8. **BN-64/8931-02** Drogi samochodowe. Oznaczanie modułu odkształcenia nawierzchni podatnych i podłoża przez obciążenie płytą.
9. **Katalog** Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych, IBDiM 2001 r.
10. **Katalog** Typowych Konstrukcji Podatnych i Półsztywnych, IBDiM 1997 r.